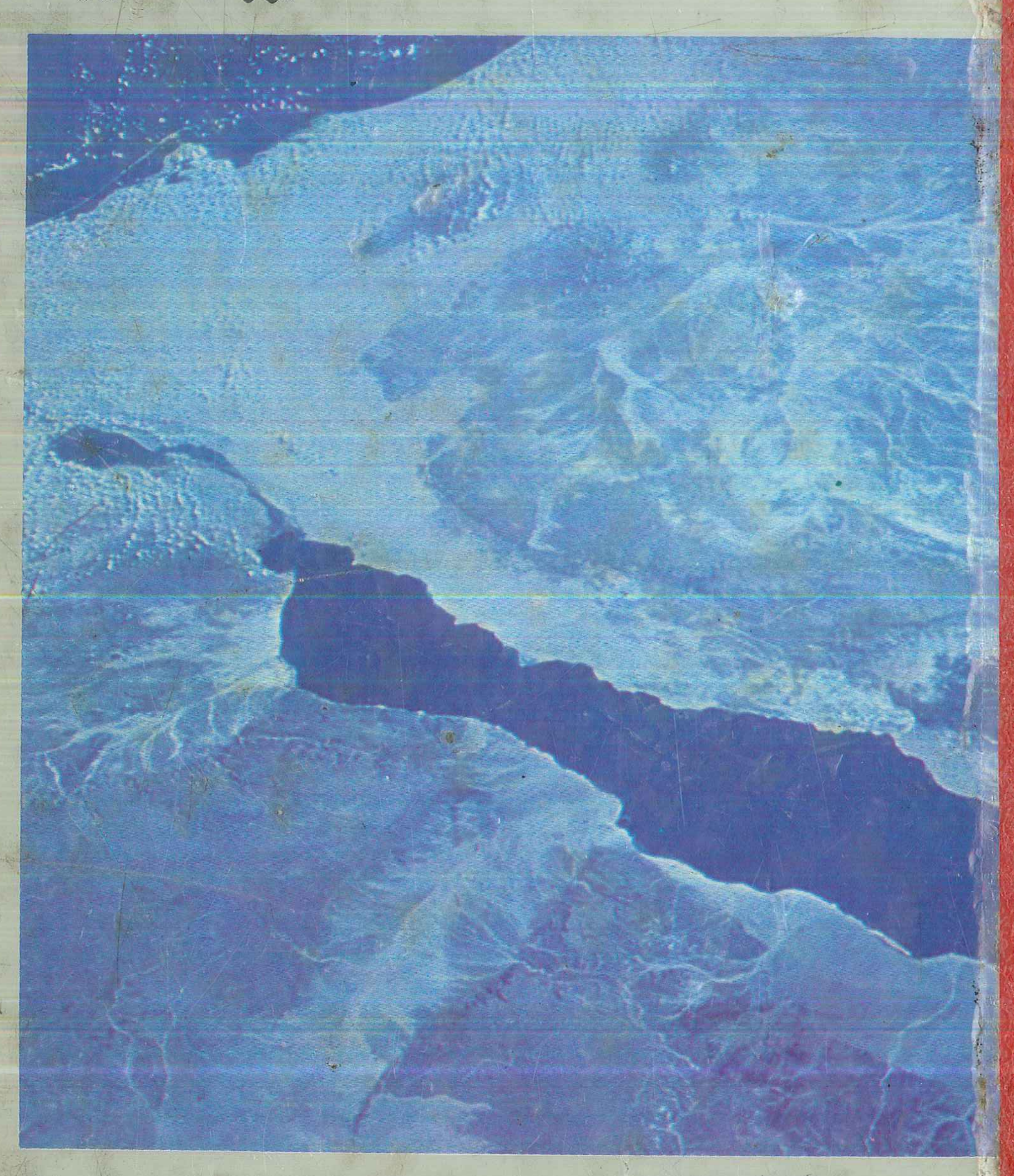
الأرض

مقدمة للجيولوجيا الطبيعية



لوتجنز

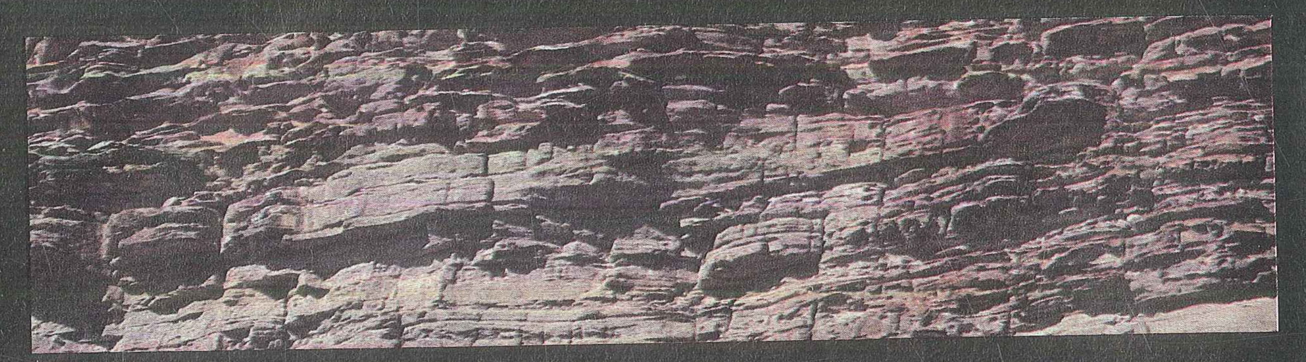
ترجمة:

د. عمر سليمان حموده

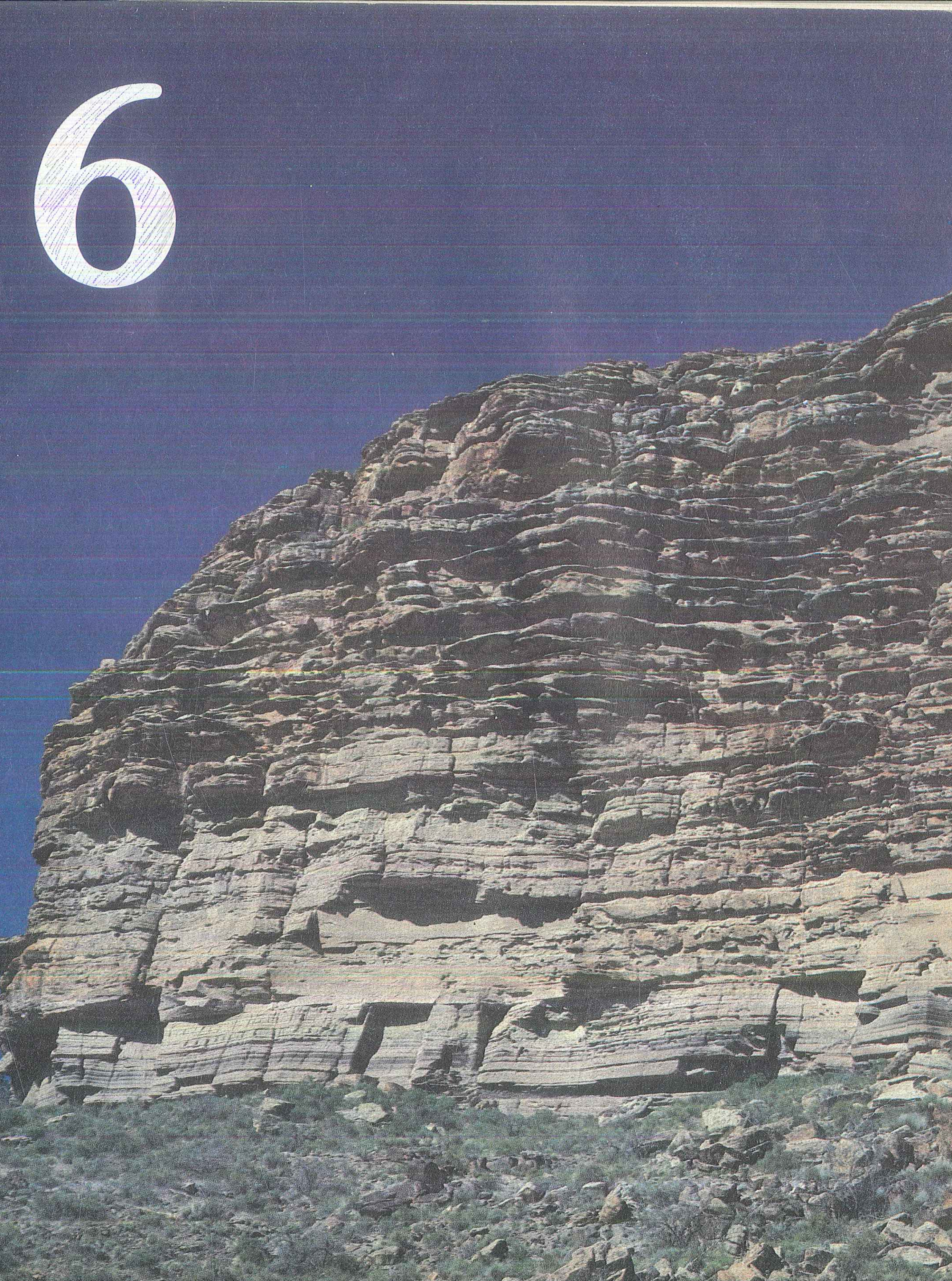
د. البهلول على اليعقوبى

د. مصطفى جمعه سالم

6



الصخور الرسوبية


6

أنواع الصخور الرسوبية
- الصخور الرسوبية الحتاتية
- الصخور الرسوبية الكيميائية

صيرورة الرواسب الى صخور رسوبية

تصنيف الصخور الرسوبية

ملامح الصخور الرسوبية

المستحاثات

مصادر الطاقة من الصخور الرسوبية
- الفحم
- النفط والغاز الطبيعي
- الطين النفطي

تشكل نواتج التجوية الميكانيكية والكيميائية المواد الخام للصخور الرسوبية. فكلمة رسوبية تشير الى طبيعة هذه الصخور لأنها تعنى مواد مترسبة فى سائل، غير أن هذا لا يشمل كل الرسوبيات الا أن معظمها يترسب بهذه الطريقة. فيتم، باستمرار جرف القطع المجواة من الصخور ونقلها بعيدا، ومن ثم ايداعها فى بحيرات ومجارى أنهار وبحار ومواقع أخرى لا حصر لها. فالحبيبات التى فى كثيب رملى بالصحراء، والطين الذى فى قاع مستنقع، والحصى الذى يغطى قاع مجرى للمياه، وكذلك الغبار الذى يغطى أثاث غرفة المعيشة، كلها أمثلة لهذه العمليات المستمرة. وحيث أن تجوية الصخور ونقلها وتراكم نواتج التجوية هى عملية مستمرة، فان الرسوبيات توجد فى كل مكان. وبتراكم كميات من الرواسب فان المواد التى فوق القاع تبدأ فى التراص، وبمرور فترة زمنية طويلة تكون هذه الرواسب قد التحمت مع بعضها بواسطة مواد معدنية تترسب فى الفراغات التى بين حبيباتها لتكوّن صخرا صلبا.

حجر تابيتسى الرملى الذى يتكشف فى منطقة الجراند كانيون (الاخدود الكبير).

وحسب تقدير الجيولوجيين فان الصخور الرسوبية تشكل 5% فقط (من حيث الحجم) من الـ 16 كيلومترا الخارجية للقشرة الأرضية. ولكن أهمية هذه الصخور تفوق بكثير هذه النسبة الصغيرة التى تمثلها. وبمعاينة الصخور النابطة على سطح الأرض نجد أن معظمها من الصخور الرسوبية. وفى الواقع 75 % من الصخور الظاهرة على اليابسة تصنف على أنها صخور رسوبية. ولهذا يمكن اعتبار أن الصخور الرسوبية تكوّن طبقة رقيقة ولكنها غير متصلة فى الجزء الأعلى من القشرة الأرضية. وهذه الحقيقة يمكن فهمها على اعتبار أن هذه الصخور تتكون عند أو قرب سطح الأرض.

وبما أن الرواسب تتجمع عند سطح الأرض، فطبقات الصخور التى تنتج عنها تحمل الدليل على الوقائع التى حدثت هناك. والصخور الرسوبية بطبيعتها تحوى بين طياتها اشارات للبيئة التى ترسبت فيها أجزاؤها. وفى بعض الحالات تحتوى اشارات الى الطريقة التى تم بها الترسيب. ولهذا فمن مجموعة هذه الصخور يتحتم على الجيولوجيين وضع التصور لتفاصيل تاريخ الأرض.

وفى النهاية تجدر الاشارة الى أن كثيرا من الصخور الرسوبية مهمة اقتصاديا. فيصنف الفحم، مثلا، على أنه صخر رسوبى، بينما توجد مصادر الطاقة الأخرى الأساسية بالنسبة لنا كالنفط والغاز الطبيعى ملازمة للصخور الرسوبية وتمثل صخورا أخرى مصادر هامة للحديد والألومينيوم والمنجنيز والسماد ومواد عدة أساسية لصناعة البناء.

أنواع الصخور الرسوبية

للمواد المتراكمة كرواسب مصدران أساسيان. أولا، قد تتجمع الرواسب كتراكم لمواد نشأت ونقلت صلبة كنتاج للتجوية الميكانيكية والكيميائية معا. وهذا النوع من الرواسب يسمى رواسب حتاتية، والصخور التى تنتج عنها تسمى **بالصخور الرسوبية الحتاتية**. ثانيا، تترسب المواد الذائبة الناتجة عن التجوية الكيميائية بواسطة العمليات

العضوية واللاعضوية، وتعرف بالرواسب الكيميائية وتسمى الصخور الناتجة عنها بالصخور الرسوبية الكيميائية.

الصخور الرسوبية الحتاتية

وبالرغم من وجود العديد من المعادن وفتات الصخور فى الصخور الحتاتية، فان معادن الطفلة والكوارتز (المرو) تمثل المكونات الرئيسة لمعظم الصخور الرسوبية من هذا الصنف. تذكّر أن معادن الطفلة هى المعادن الأكثر وفرة بين نواتج معادن السليكات المتعرضة للتجوية الكيميائية وعلى الأخص معادن الفلسبار. فمعادن الطفلة هى معادن دقيقة الحبيبات ذات بنية بلورية على هيئة رقائق تشبه رقائق معدن المايكا. أما المعدن الآخر المألوف، الكوارتز (المرو)، فهو وفير لأنه شديد المقاومة للتجوية الكيميائية. ولهذا عندما تتعرض الصخور النارية مثل الجرانيت لعمليات التجوية فان حبيبات المرو تصبح حرة. كما تتواجد معادن أخرى فى بعض الصخور الحتاتية مثل الفلسبار والمايكا. وحيث أن هذه المعادن تتغير بسرعة بفعل التجوية الكيميائية الى مواد جديدة، فان وجودها فى الصخور الرسوبية يدل على أن عملية التجوية قد تمت بواسطة التجوية الميكانيكية بدلا من التجوية الكيميائية.

ويعتبر حجم الحبيبات هو المعيار الأساسى فى التفريق بين أنواع الصخور الرسوبية الحتاتية المختلفة. ويبين الجدول 6 ـ 1 تصنيفات الحجم للحبيبات المكونة للصخور الحتاتية. لاحظ أن كلمة طين حسب استعمالها فى هذا السياق تشير فقط الى حجم معين ولا تعنى المعادن المسماة بنفس الأسم. ورغم أن معظم معادن الطفلة لها حبيبات بحجم الطفلة، الا أنه لا تتكون كل الرواسب التى هى بحجم الطفلة من معادن الطفلة المعروفة.

ويمكن فى العادة ربط حجم الحبيبات فى الصخور الحتاتية بطاقة الوسط الناقل لهذه الحبيبات. وتفرز تيارات الماء أو الهواء الحبيبات التى تنقلها حسب حجمها. فكلما كان التيار قويا كان حجم الحبيبات التى ينقلها كبيرا. فالجرول مثلا تنقله مجارى المياه السريعة، كما تنقله الانهيارات الجبلية والمجالد. أما الطاقة اللازمة لنقل حبيبات الرمل فهى أقل، ولهذا فهى عادة، تتوفر فى مواقع مثل الكثبان الناتجة عن نفخ الرياح. وكذلك أيضا فى التراكمات النهرية والشاطئية. وحيث أن حبيبات الغرين والطفلة تترسب ببطء، فان تراكمات مثل هذه المواد ترتبط عادة بالمياه الهادئة فى البحيرات والأهوار والمستنقعات والبيئات البحرية.

الحجر الطينى: الحجر الطينى هو صخر رسوبى متكون من حبيبات الغرين والطفلة (شكل 6 ـ 1 أ). وهذه الصخور الحتاتية دقيقة الحبيبات تشكل ما يقدر بسبعين فى المائة من كل الصخور الرسوبية. وحجم الحبيبات بهذه الصخور هو من الصغر بحيث لا يمكن التعرف عليها دون تكبير هائل (شكل 6 ـ 2). حيث أن الرواسب ليست مجهرية فحسب ولكنها أيضا منبسطة ومفلطحة فهى عادة ما توجد متراصة مع بعضها. ونتيجة لذلك لا يوجد متسع بين حبيباتها لمرور السوائل المحملة بالمواد اللاصقة. ولهذا فان الصخور الطينية عادة ما تكون رديئة التلاحم وتتفتت بسهولة. ورغم أن الصخور الطينية وفيرة الا أنها تعتبر من بين الصخور

جدول 6 ـ 1

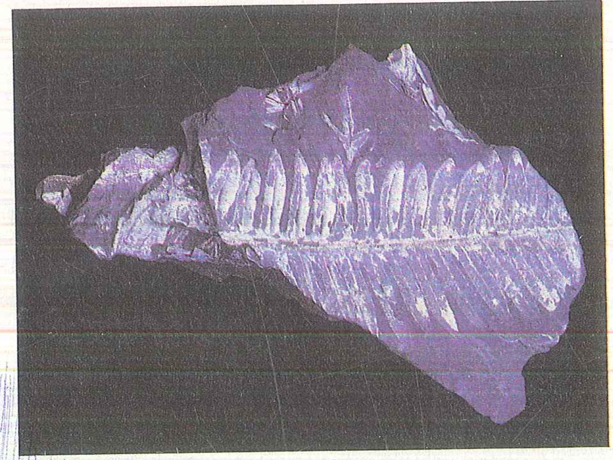
تصنيف حجم الحبيبات للصخور الفتاتية

صخور حتاتية	حجم الحبيبات	اسم الحبيبات	مدى الحجم (بالمليمتر)
رصيص أو بريشة	جرول	جلمود	أكبر من 256
		حجرة	64 ـ 256
		حصاة	4 ـ 64
		حبة	2 ـ 4
حجر رملى	رمل	رمل	1 / 16 ـ 2
حجر طينى أو حجر وحلى	وحل	غرين	1 / 256 ـ 2
		طفلة	اقل من256 / 1

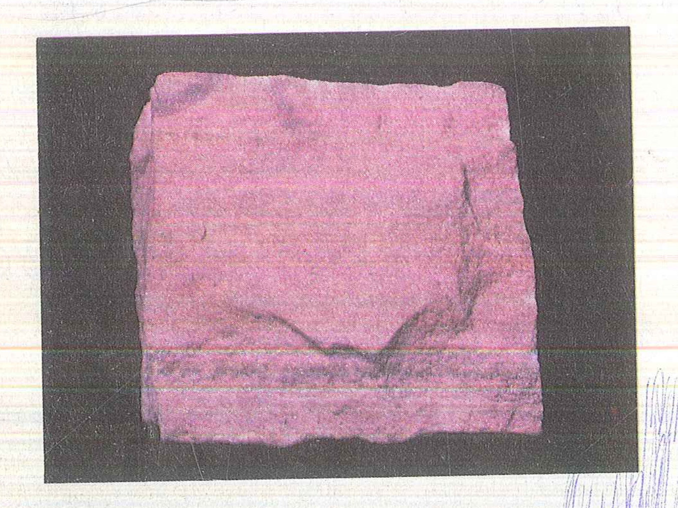
الرسوبية التى لا يعرف عنها الا القليل. فالصخور الطينية لا تكوّن بروزات واضحة كما هو الحال بالنسبة للصخور الرملية والصخور الرسوبية الأخرى. هذا بالاضافة الى أن الطين يتجوى بسهولة ويكوّن غطاء من التربة يحجب الصخور التى تحته.

وتطلق كلمة طين عادة على كل الصخور الحتاتية الدقيقة ولكن كثيرا من الجيولوجيين لديهم استعمال أكثر تحديدا لهذا اللفظ. وفى هذا الاستعمال الأكثر تحديدا، فان الطين لا بد أن يظهر قابليته للانفصال الى شرائح رقيقة على امتداد أسطح واضحة ومتقاربة، وعندما ينفصل الصخر على هيئة كتل أو قطع تستعمل كلمة الحجر الوحلى.

الحجر الرملى: الحجر الرملى هو الاسم الذى تسمى به الصخور التى تسود فيها الحبيبات ذات حجم الرمل (شكل 6 ـ 1 ب). ويأتى ترتيبه من حيث الوفرة بعد الحجر الطينى حيث يشغل ما يقرب من 20 % من كامل المجموعة. وفى معظم الصخور الرملية يسود معدن الكوارتز وفى هذه الحالة



أ



ب



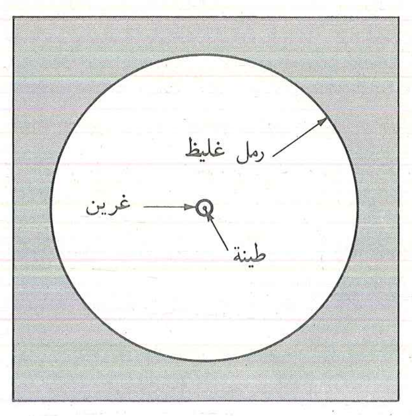
جـ



د

شكل 6 ـ 1

الصخور الرسوبية الحتاتية الشائعة. (أ) ـ حجر طينى. (ب) ـ حجر رملى. (جـ) ـ رصيص (د) ـ بريشة.



شكل 6 ـ 2
مقارنة بين أحجام ثلاثة أنواع من الرواسب الفتاتية. رغم قوة التكبير الى 65 مرة تقريبا فان حجم حبة الطفلة يكاد لا يرى.

يسمى الصخر حجر الكوارتز (المرو) الرملى. فاذا احتوى الصخر على كمية مناسبة من الفلسبار فان الصخر يسمى **أركوزا** وتشير وفرة الفلسبار الى أن الرواسب قد تعرضت الى قدر قليل من التجوية الكيميائية. وفى النهاية هناك صنف ثالث من الصخور الرملية يعرف **بالجرايواكى**. بالاضافة الى احتواء هذا الصخر، غامق اللون، على الكوارتز (المرو) والفلسبار، فهو يحتوى أيضا على وفرة من الكسر الصخرية المزواة وعلى الطفلة. ولأن حبيبات الجرايواكى تتميز برداءة فرزها فهو كثيرا ما يعرف بالحجر الرملى المتسخ.

الحجر الرصيصى: يتألف الحجر الرصيصى فى معظمه من الجرول (شكل 6 ـ 1 جـ). وكما يوضح الجدول رقم 6 ـ 1 يمكن أن تتراوح هذه القطع من الجلاميد الكبيرة الى حبيبات بحجم حبة بازلاء الجنائن. فالقطع الكبيرة عادة ما تكون قطعا صخرية وعادة ما تمتلىء الفراغات التى بين حبات الجرول بالطفل والرمل ثم تلتحم الكتلة برمتها وتصير صخرا صلبا. فاذا كانت القطع الصغيرة مزواة بدلا من مدورة فان الصخر يسمى بريشة (شكل 6 ـ 1 د).

الصخور الرسوبية الكيميائية

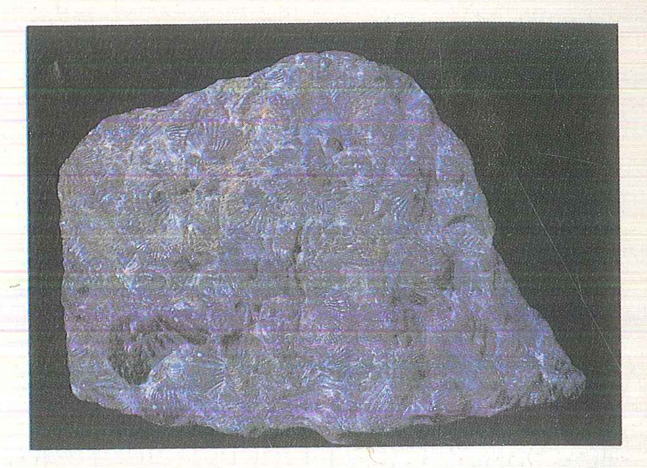
وخلافا للصخور الحتاتية التى تتألف من النواتج الصلبة للتجوية فان الصخور الرسوبية الكيميائية تستمد من مواد كانت قد حملت الى البحيرات والبحار على هيئة محاليل. ولا تبقى هذه المواد مذابة فى الماء الى الأبد حيث أن بعضها يترسب فى صورة جزيئات تتراكم لتكوّن راسبا كيميائيا. وقد يحدث هذا الترسيب مباشرة نتيجة لعمليات غير عضوية أو بطريقة غير مباشرة نتيجة لعمليات حياتية للكائنات المائية. وتعرف الرسوبيات المكونة بالطريقة الثانية بأن لها أصلا كيميائيا حياتيا (شكل 6 ـ 3).

ومن أمثلة التراكم الناتج عن عمليات كيميائية غير عضوية، الأملاح التى تتركها المياه المالحة بعد تبخرها. وبالمقابل، تنتزع كثير من الحيوانات والنباتات المائية المواد المعدنية المذابة لتبنى أصدافا وأجزاء أخرى صلبة. وتتجمع هياكل هذه الكائنات بعد موتها فوق قيعان البحيرات والمحيطات.

الحجر الجيرى: يعتبر الحجر الجيرى أكثر الصخور الرسوبية الكيميائية وفرة حيث يمثل 15 % من حجم الصخور الرسوبية، ويتألف بصورة رئيسية من معدن الكالسيت (كاك أ$_3$) الذى يترسب اما بطريقة غير عضوية أو نتيجة للطرق الكيميائية الحياتية. ويعتبر الحجر الجيرى المكوّن بطريقة كيميائية حياتية أكثر شيوعا. ويرجح أن 30% من الحجر الجيرى المتراكم فى العالم قد تراكم نتيجة للترسيب الكيميائى الحياتى.

ورغم أن معظم الحجر الجيرى ينتج عن العمليات الحياتية الا أنه لا يمكن التعرف دائما على أصله. ويرجع السبب فى ذلك الى أن الأصداف والهياكل قد تتعرض لتغيرات كثيرة قبل أن تصير صخرا. ومع ذلك فان هناك حجرا جيريا ذا أصل كيميائى حياتى يمكن التعرف عليه بسهولة، هو الكوكينا، وهو عبارة عن صخر خشن مؤلف من أصداف وفتات صدفى قليل التماسك. ومثال آخر أقل وضوحا ولكنه رغم ذلك مثال مألوف، وهو الطباشير (الجص)، فهو صخر مكوّن فى معظمه من الأجزاء الصلبة للمنخربات، وهى كائنات مجهرية لا يزيد حجمها على رأس الدبوس (شكل 6 ـ 4).

ويتكون الحجر الجيرى ذو الأصل غير العضوى عندما يعمل التبخر أو ارتفاع درجة الحرارة على زيادة تركيز كربونات الكالسيوم الى الدرجة التى تترسب عندها. ومثال ذلك نوع الحجر الجيرى الذى يترسب فى الكهوف عادة ويسمى ترافرتين، وكذلك الحجر العوينى. ويترسب الترافرتين عندما تتبخر المياه الجوفية المشبعة بكربونات الكالسيوم، أما ترسب الحجر الجيرى العوينى فهو معقد نوعا. وهو يتألف من حبيبات كروية صغيرة تسمى العوينات ويتكون الحجر العوينى فى المياه الضحلة بتدحرج جزيئات رقيقة جيئة وذهابا على قاع المحيط بفعل التيارات المائية ومن ثمّ تغلف بطبقات تتلوها طبقات من كربونات الكالسيوم.



شكل 6 ـ 3
هذه الصخور الرسوبية المكونة من الأصداف والفتات الصدفى لها اصل كيميائى حياتى واضح.

الدولوميت: والدولوميت له علاقة وثيقة بالحجر الجيرى وهو صخر يتألف من معدن كربونات الكالسيوم والماغنيسيوم والتى تحمل نفس الاسم. واستعمال كلمة دولوميت لتدل على

شكل 6 ـ 4
جدران الجس الأبيض قرب مدينة دوفر.

كل من المعدن والصخر هو من الحالات النادرة ويستعمل بعض الجيولوجيين كلمة **الحجر الدولوميتي**، تجنبا للخلط بين معدن الدولوميت والصخر المكون منه. ورغم أن الدولوميت يترسب مباشرة من مياه البحر، الا انه يعتقد بأن معظمه ينشأ عندما يحل الماغنيسيوم فى مياه البحر محل بعض الكالسيوم فى الحجر الجيرى. وما يدعم هذه النظرية هو عدم وجود صخور حديثة من الدولوميت. ولكن معظم صخور الدولوميت تعتبر قديمة حيث يتوفر الوقت الكافى لاحلال الماغنيسيوم محل الكالسيوم.

حجر الصوان: حجر الصوان أو الشيرت هو الاسم المستعمل لعدد من الصخور الصلبة وشديدة التراص المكونة من السليكا (س أ$_2$) مجهرية التبلر. وأحد الأنواع المعروفة هو **الصوان (الفلنت)**، الذى يستمد لونه الغامق من المواد العضوية التى يحتويها. أما **الجاسبر** فهو نوع أحمر يستمد لونه الفاقع من أكسيد الحديد الذى يحتوى عليه.

وتوجد ترسبات الصوان عادة فى واحد من حالتين: اما على هيئة عجيرات غير منتظمة الشكل فى الحجر الجيرى أو على هيئة طبقات صخرية. ويعتقد بأن السليكا المكونة للعجيرات قد ترسبت مباشرة من مياه البحر، ولهذا فان للعجيرات أصلا غير عضوى. ومن المستبعد جدا أن تكون النسبة الكبيرة من طبقات الصوان قد ترسبت مباشرة من مياه البحر لأن مياه البحر عادة، تكون غير مشبعة بالسليكا. ولهذا فانه يعتقد أن طبقات الشيرت قد نشأت على هيئة رسوبيات كيميائية حياتية. ورغم أن معظم الكائنات المائية التى تنتج عنها أجزاء صلبة تفرز أصدافا مكونة من كربونات الكالسيوم الا أن بعضها مثل المشطورات والشعاعيات تنتج هياكل شبه زجاجية من السليكا. وهذه الأنواع من الكائنات لها القدرة على انتزاع السليكا من محاليل غير مشبعة. ومما يجب الاشارة اليه هو أنه عند فحص عينات من الصوان والذى قد يطلب منك عمله فى المعمل، فانه توجد مميزات قليلة جدا يمكن الاعتماد عليها فى تحديد نشأة الصوان (عضوى أو كيميائى حياتى).

الملح الصخرى والجبس الصخرى: غالبا ما تتكون الرواسب الكيميائية بواسطة عمليات التبخر. وتشمل المعادن المترسبة بهذه الطريقة الهاليت (كلوريد الصوديوم). وهو المكون الرئيسى للملح الصخرى، والجبس (كبريتات الكالسيوم المميأة). وهى المكون الرئيسى للجبس الصخرى. وفى الماضى البعيد هناك أماكن كثيرة كانت تغطيها أذرع ضحلة من البحر، ما لبثت أن انقطعت عنه وأصبحت فيما بعد بحارا مغلقة، وذلك مثل بحر قزوين اليوم. وعندما يتبخر الماء يترك وراءه الأملاح على هيئة **ترسبات بخرية**. وتعد هذه الترسبات اليوم مصدرا مهما لمواد كيميائية عديدة. وهناك ترسبات مماثلة يمكن رؤيتها فى أماكن مختلفة مثل وادى الموت بكاليفورنيا. فهناك تجرى الوديان من المناطق الجبلية المجاورة الى حوض مغلق وذلك عقب هطول الأمطار أو ذوبان الثلوج التى فوق الجبال. وعندما تتبخر المياه وتترك وراءها المواد المذابة على هيئة قشرة بيضاء فوق الأرض تسمى **مسطحات الملح** (شكل 6 ـ 5).

صيرورة الرواسب الى صخور رسوبية

يدل التصخّر على العمليات التى تصير عبرها الرواسب الى صخور رسوبية متماسكة. واحدى العمليات المؤثرة فى الرواسب والأكثر شيوعا تسمى بعملية **التراص**. وبتراكم الرسوبيات بمرور الزمن، يضغط وزن المواد اللاحقة على الرسوبيات السابقة. وعندما تنضغط الحبيبات الى بعضها يتناقص الفراغ الذى يفصلها تناقصا كبيرا. فمثلا عند ردم الطفلة تحت مواد يصل سمكها عدة آلاف من الأمتار فان تناقص حجم الطفلة قد يصل الى 40 % وحيث أن الرمال والرسوبيات الخشنة الأخرى هى قليلة التضاغط فان للتراص ـ كعملية تصخر ـ أهمية واضحة فى الصخور الرسوبية دقيقة الحبيبات مثل الحجر الطينى.

التلاصق: هو وسيلة أخرى هامة يتم خلالها انتقال الرسوبيات الى صخور رسوبية. تنتقل المادة اللاصقة على هيئة محلول بواسطة المياه التى تتخلل الفراغات المتاحة بين

الحبيبات. وعبر الزمن، فان ترسب المادة اللاصقة من المياه يملأ الفراغات المتاحة ويصل بين الحبيبات. ومن أهم المواد اللاصقة المعروفة الكالسيت والسليكا وأكسيد الحديد. ويعتبر تحديد المادة اللاصقة أمرا سهلا نسبيا. فلصقة الكالسيت تتفاعل مع حامض الهيدروكلوريك المخفف. أما لصقة السليكا فهى أصلب المواد اللاصقة، وهى بذلك تنتج أصلب الصخور الرسوبية. وحينما يبدو لون الصخور الرسوبية برتقاليا، أو أحمر غامقا فان ذلك يدل عادة على تواجد أكسيد الحديد. وفى بعض الحالات قد يكون للمادة اللاصقة فوائد اقتصادية مثال أكسيد الحديد.

ولو أن معظم الصخور الرسوبية قد تصخرت بفعل التراص أو التلاصق أو كلاهما فان بعضها يتكون من بلورات متشابكة. وهذا النوع من التصخر مقصور على بعض الصخور الرسوبية المتراكمة كيميائيا.

تصنيف الصخور الرسوبية

تنقسم الصخور الرسوبية حسب التصنيف الذى يظهر فى الجدول رقم 6 ـ 2 الى مجموعتين رئيسيتين هما: الحتاتية والكيميائية. وبالاضافة الى ذلك نرى أن الصفة التى تصنف على أساسها الصخور الحتاتية هى حجم الحبيبات، بينما تصنف الصخور الكيميائية على أساس التركيب المعدنى.

وكما هو الحال بالنسبة لغالبية طرق التصنيف الخاصة بالظواهر الطبيعية، فان التقسيمات الموضحة فى الجدول رقم 6 ـ 2 تعد أقل مرونة من أوضاعها الحقيقية. وفى الواقع، تصنف كثير من الصخور الرسوبية على أنها تتبع المجموعة الكيميائية فى الوقت الذى قد تحتوى فيه على كميات صغيرة من الرسوبيات الحتاتية. فمثلا تحتوى أنواع كثيرة

شكل 6 ـ 5
رقع الملح هذه المؤلفة من الجبس وملح الطعام فى ديث فالى (وادى الموت) بولاية كاليفورنيا هى أمثلة لتراكمات الرواسب البخرية.

جدول 6 ـ 2

تقسيم الصخور الرسوبية

الصخور الحتاتية

اسم الصخر	ملاحظات	اسم الراسب وحجم الحبيبات	النسيج
الحجر الرصيص	قطع صخرية مدورة	جرول اكبر من 2 ملم	فتاتى
بريشة	قطع صخرية مزواة		
حجر رملى مروى	يغلب المرو	رمل 16 / 1 ـ 2 ملم	
اركوز	مرو مع وفرة من الفلسبار		
قراى واكى	لون غامق، مرو، مع وفرة من الفلسبار والطفلة وقطع الصخور		
حجر طينى	ينفصل الى رقائق رقيقة		
حجر وحلى	يتفتت الى عبابيد أو كتل		

الصخور الكيميائية

اسم الصخر	التركيب	النسيج	المجموعة
حجر جيرى	كالسيت كا ك $أ_3$	فتاتى أو غير فتاتى	غير عضوى
حجر الدولوميت	دولوميت كا ما (ك $أ_3$ $)_2$	فتاتى أو غير فتاتى	
شيرت	مرو دقيق البلورات كوارتز س $أ_2$	غير فتاتى	
حجر الملح	هاليت ص كل	غير فتاتى	
حجر الجبس	جبس كا كب $أ_4$ 2 $يد_2$ أ	غير فتاتى	
حجر جيرى	كالسيت كا ك $أ_3$	فتاتى أو غير فتاتى	كيميائى عضوى
شيرت	مرو دقيق البلورات كوارتز س $أ_2$	غير فتاتى	
فحم	بقايا نباتات متغيرة	غير فتاتى	

من الحجر الجيرى على كميات من الطين أو الرمل مسدية له صفة طينية أو رملية. وحيث أن فى الصخور الحتاتية مواد لاصقة كانت ذائبة فى الماء، فان هذه الصخور بعيدة كل البعد عن كونها نقية.

وكما هو الحال بالنسبة للصخور النارية التى نوقشت فى الفصل الثالث، فان النسيج يعتبر خاصية مهمة فى تصنيف الصخور الرسوبية. وهناك نوعان رئيسان من النسيج مستعملان فى تصنيف الصخور الرسوبية هما: النسيج **(الفتاتي)** والنسيج **اللافتاتى** . فكلمة كلاستيك التى معناها مفتتة مأخوذة من الاغريقية، وبهذا فان الصخور الفتاتية تتكون من قطع مفتتة. وبفحص الجدول رقم 6 ـ 2 يتضح أن كل الصخور الفتاتية تمتلك نسيجا مفتتاً ويبين الجدول كذلك أن بعض الصخور الكيميائية قد يظهر بها هذا النسيج. فمثلا حجر الكوكينا أى الحجر الجيرى المؤلف من الأصداف والقطع الصدفية يعتبر صخرا ذا نسيج فتاتى مثله مثل الرصيص أو الحجر الرملى. وهذا ينطبق أيضا على بعض أنواع الحجر الجيرى العوينى.

ولبعض الصخور الرسوبية الكيميائية نسيج لا فتاتى تظهر فيه المعادن على هيئة بلورات متشابكة. ولهذا السبب فان بعض الصخور اللافتاتية قد تبدو وكأنها أكثر شبها بالصخور النارية التى تتألف هى ايضا من بلورات متداخلة. ولكن يمكن عادة التفريق بين الاثنين بسهولة نظرا لأن المعادن التى توجد فى الصخور الرسوبية اللافتاتية مثل الكالسيت والهاليت والجبس تختلف تماما عن المعادن التى توجد فى الصخور النارية.

ملامح الصخور الرسوبية

كما ذكرنا سابقا، فان للصخور الرسوبية أهمية خاصة فى استنباط تاريخ الأرض. فهى تتكون عند سطح الأرض فى طبقات وكل طبقة تسجل طبيعة البيئة التى ترسبت فيها وقت ترسبها. وهذه التراكمات التى تسمى طبقات تمثل الخاصية الوحيدة المميزة للصخور الرسوبية. (شكل 6 ـ 6).

ويتراوح سمك الطبقات بين المجهرية وبين عشرات الأمتار. وتفصل الطبقات عن بعضها مستويات طبقية وهى سطوح منبسطة تنفصل أو تنقسم عبرها الصخور. ويمكن أن تنشأ المستويات الطبقية نتيجة للتغيرات التى تحدث فى حجم الحبيبات أو فى تركيب الرواسب المتراكمة. ويمكن أن يسبب التوقف فى الترسيب واستئنافه مرة أخرى فى تكوين طبقات، نظرا لأن الاحتمال ضئيل فى أن تكون الرواسب اللاحقة مطابقة تماما لما سبقها. وغالبا ما يفصل المستوى الطبقى بين نهاية ترسب معين وبداية ترسب آخر.

وحيث أن الرواسب تتراكم عادة على هيئة جزئيات تتجمع من سائل، فان معظم الطبقات تتراكم فى وضع أفقى. ولكن هناك حالات لا تأخذ فيها الرواسب وضعا أفقيا. وفى بعض هذه الحالات عندما نفحص طبقة رسوبية معينة نجد أن لها طبقية مائلة بزاوية كبيرة عن الوضع الأفقى. ويسمى هذا النوع من الطبقية **بالطبقية المتقاطعة**. وهى خاصية توجد فى الكثبان الرملية ودلتا الأنهار (شكل 6 ـ 7).

وتمثل **الطبقية المتدرجة** نوعا آخر خاصا من أنواع الطبقية. وفى هذه الحالة يتغير حجم الحبيبات تدريجيا فى طبقة رسوبية واحدة من حجم خشن عند القاع الى حجم دقيق عند القمة. وتمثل الطبقية المتدرجة التراكم السريع من مياه تحتوى على رواسب ذات أحجام مختلفة. وعندما يفقد التيار المائى سرعته فجأة فان الحبيبات الكبيرة تترسب أولا وتتبعها بعد ذلك حبيبات أصغر فأصغر على التوالى. ويقترن وجود الطبقية المتدرجة عادة بتيار العكر، وهو حالة من الماء المحمل بالرواسب بحيث تزيد كثافته عن كثافة المياه الصافية ويتحرك الى اسفل المنحدرات فى قيعان البحيرات والمحيطات.

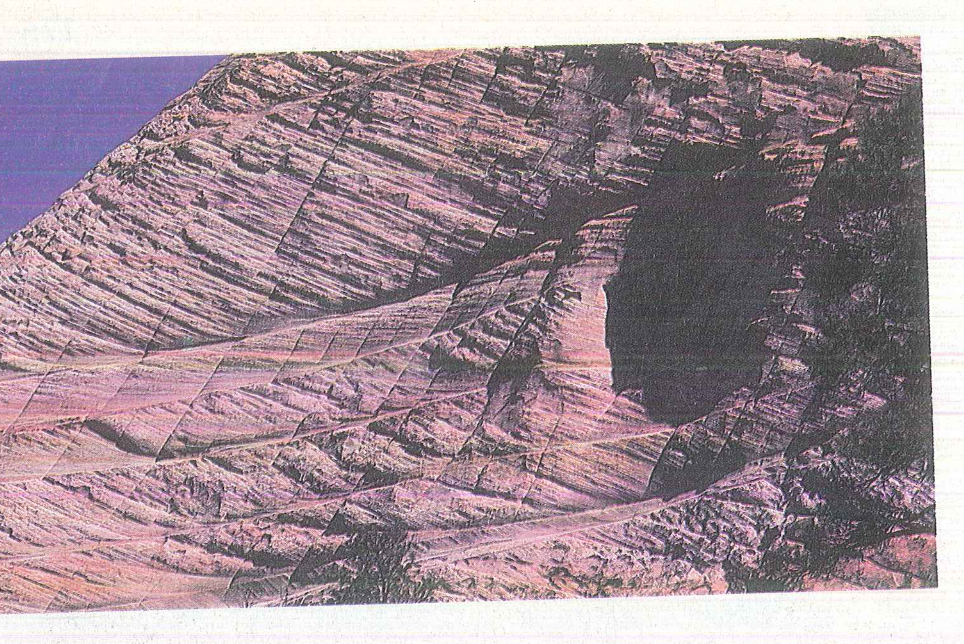
ويمكن استقراء أمور كثيرة من خلال فحص الجيولوجيين للصخور الرسوبية. فالرصيص مثلا، يمكن أن يدل على بيئة ذات نشاط مرتفع، كما هو الحال بالنسبة للمجارى المائية السريعة، حيث لا يمكن أن تترسب سوى

أ

ب



شكل 6 ـ 6
توضح هذه التكشفات الرسوبية الطبقات المميزة لهذه المجموعة من الصخور.



شكل 6 ـ 7

تشير الطبقية المتقاطعة لهذا الحجر الرملى الى أن هذا الحجر كان فى يوم ما يمثل كثيبا رمليا.

شكل 6 ـ 8

قطاع عرضى لمجرى مائى قديم يملؤه الرصيص. ففى بيئات الترسيب ذات النشاط المرتفع، تترسب فقط المواد خشنة الحبيبات.

المواد الخشنة (شكل 6 ـ 8). واذا كان نوع الصخور أركوزا فيمكن أن يشير ذلك الى مناخ جاف، حيث لا يحدث تغيرّ كيميائى كبير فى معادن الفلسبار. أما الطين الكربونى فيدل على بيئة ذات نشاط منخفض غنية بالمواد العضوية مثل ما يحدث فى المستنقعات أو فى الأهوار.

وتوجد فى الصخور الرسوبية ملامح أخرى تنبىء عن البيئات القديمة التى كانت سائدة. وأحد هذه الملامح هى علامات النيم. **وعلامات النيم** هى موجات رملية صغيرة تنشأ على سطح الطبقات الرسوبية بواسطة حركة الماء أو الهواء (شكل 6 ـ 9 أ). وتكون حروف علامات النيم متعامدة على اتجاه الحركة. فاذا كانت علامات النيم ناشئة عن حركة الماء أو الهواء فى اتجاه واحد فانها تحدث أشكالا عديمة التماثل، وتكون جوانب علامات النيم التى فى اتجاه التيار أكثر انحدارا من جوانبها التى فى عكس اتجاهه. ومن أمثلة علامات النيم الناشئة عن التيارات، تلك التى تنتج فى مجارى المياه المتحركة عبر قنوات المياه الرملية، أو التى تنشأ عندما تهب الرياح فوق الكثبان الرملية. وتدلنا علامات النيم التى توجد فى الصخور المتصلبة على معرفة اتجاهات الرياح والمجارى المائية القديمة. أما علامات النيم المتماثلة فتسمى بعلامات **نيم التارجح**. وهى تنشأ عادة من حركة الأمواج السطحية مجيئة وذهابا فى المياه الضحلة القريبة من الشواطىء.

وتشير **تشققات الوحل** (شكل 6 ـ 9 ب)، على أن الرواسب التى تحتويها قد تعرضت لفترات متعاقبة من البلل والجفاف. وعندما يتعرض الوحل المبلل للهواء، فانه يجف ويتقلص محدثا تشققات. ويدل وجود التشققات على بيئات معينة مثل البحيرات الضحلة والأحواض الصحراوية.

المستحاثات:

تمثل **المستحاثات**، التى هى دلالات أو بقايا الحياة القديمة، أهم اللامح التى تتضمنها الصخور الرسوبية. فالمستحاثات وسائل هامة لاستنباط التاريخ الجيولوجى، ومعرفة طبيعة هيئات الحياة التي كانت سائدة ، كما تساعد فى الاجابة على الأسئلة التي تتعلق بالبيئة. والمستحاثات علاوة على ذلك، هى دلائل مهمة على الزمن، وهى تقوم بدور اساسى فى مضاهاة الصخور من مناطق مختلفة يجمعها زمن واحد.

وتشكل المستحاثات عدة أنواع. فبقايا الأحياء الحديثة نوعا قد لا تتغير بتاتا. وبعد وقت كاف من المتوقع أن تتحجر (بمعنى أنها تتبدل الى حجارة). وهذا يعنى أن المادة الأصلية، مثل الخشب أو العظام، قد حل محلها مواد معدنية مترسبة من المحاليل الجارية خلال الصخور، أو أن الفراغات قد ملأتها المعادن المترسبة (شكل 6 ـ 10 أ). وتشكل الانطباعات صنفا آخر شائعا من أصناف المستحاثات (شكل 6 ـ 10 ب). وفى بعض الأحيان قد تعمل الانطباعات عمل القوالب التى تملؤها الرواسب وتتصلب فيما بعد. وعندما تكسرّ الصخور، فان كلا من الانطباع (القالب) والهيئة قد يعكس بأمانة الشكل والعلامات الخارجية للكائن الحى (شكل 6 ـ 10 د). وهناك نوع آخر من أنواع الاحاثة يترك غشاء رقيقا من الكربون. وهذه طريقة شائعة لحفظ أوراق النباتات والبقايا الرقيقة للحيوانات (شكل 6 ـ 10 د). هذا بالاضافة الى وجود عدد من أنماط الاحاثة الأخرى والتى يعتبر كثير منها آثارا لحياة ما قبل التاريخ.

وتمثل المستحاثات المحفوظة جزءا ضئيلا فقط من الحيوانات التى عاشت عبر الماضى الجيولوجى. وعادة ما يكون الفناء الكامل مصير بقايا النباتات أو الحيوانات. فتحت أى الظروف يتم حفظها؟.. يبدو أن هناك شرطين لازمين لذلك، هما: ـ الردم السريع وامتلاك أعضاء صلبة.

وفى العادة، عندما ينفق كائن حى تلتهمه الحيوانات القمامة أو يتحلل بواسطة البكتيريا، واحيانا تغطى الرواسب بقايا الكائنات الميتة. وعندما يحدث ذلك يتم عزل هذه البقايا عن الظروف التى تسود فيها عوامل الفناء. ولذلك يعد الردم السريع شرطا من شروط الحفظ.

هذا بالاضافة الى أن للكائنات فرصة أكثر ملاءمة



أ ب

شكل 6 ـ 9

أ ـ تنتج علامات النيم عديمة التماثل هذه عن التيارات المائية أو الهوائية. ب ـ تتكون التشققات الطينية عندما يجف الوحل أو الطفلة وينكمش.

للحفظ لتصبح جزءا من سجل المستحاثات اذا كانت تمتلك أجزاء صلبة. ورغم أنه توجد آثار وانطباعات لأجزاء الحيوانات الرخوة مثل قناديل البحر الهلامى والديدان والحشرات، الا أنها نادرة على أقل تقدير. وتتحلل اللحوم عادة بسرعة لدرجة أن حفظها يعد مستبعدا. ويغلب على سجل الحياة القديمة الأصداف والعظام والأسنان وكذلك الأعضاء الصلبة المشابهة.

ونظرا لتوقف الحفظ على شروط خاصة، فان سجل الحياة فى الماضى الجيولوجى لا يمثل الواقع. أما بقايا المستحاثات لتلك الكائنات التى لها أجزاء صلبة والتى عاشت فى مناطق الترسيب فهى وفيرة جدا. ولكننا نحصل فقط على معاينة عابرة للتنوع المتعدد لأشكال الحياة الأخرى التى لم تتوفر لها الشرو الخاصة الملائمة للحفظ.

مصادر الطاقة من الصخور الرسوبية

يعتبر كل من الفحم والنفط والغاز الطبيعى الوقود الأساس لاقتصادنا الصناعى المعقّد. وفى السنوات الحاضرة، لما أصبحت أزمة النفط تحتل الصدارة فى نشرات الأخبار العالمية، أصبح هناك اهتمام كذلك بهذه المصادر الحساسة للطاقة. فبالاضافة الى الزيادة المطردة فى انتاج واستعمال الفحم، قادت الأزمة الى الاهتمام المتجدد بتطوير مصادر بديلة للطاقة، وأحد هذه المصادر، الطين النفطى،

الذى كان يرد ذكره دائما كحل جزئى محتمل لمشاكل الطاقة لدينا. وفى الجزء التالى سوف نتعرض باختصار لهذه المصادر الهامة الملازمة للصخور الرسوبية.

الفحم

يصعب تصنيف الفحم لاختلافه الواضح عن الصخور الرسوبية الأخرى. ورغم ذلك فانه غالبا ما يصنف مع الصخور الرسوبية العضوية. ولكن على العكس من أنواع الصخور الأخرى فى هذه المجموعة، والتى هى غنية بالسليكا أو الكالسيت، فان الفحم يتكون من المواد العضوية. ويوضح الفحص الدقيق لقطعة من الفحم تحت المجهر أو العدسة المكبرة، غالبا، وجود تركيبات نباتية متعددة مثل الأوراق واللحاء والخشب، والتى تبدو متغيرة كيميائيا ولكنها رغم ذلك يمكن التعرف عليها بسهولة. ان ذلك يعزز الاستنتاج القائل بأن الفحم هو المرحلة النهائية لردم كميات كبيرة من المواد النباتية لفترات طويلة.

ويضم الفحم الى النفط والغاز الطبيعى فى اعتباره وقودا متحجرا. وتعتبر هذه الصفة مناسبة بالتأكيد، حيث اننا كلما حرقنا الفحم كلما استعملنا الطاقة الشمسية المخزنة فى النباتات منذ ملايين السنين. فنحن حقا نحرق المستحاثات.

والمرحلة الأساسية لتكوّن الفحم هى تراكم كميات كبيرة من المواد النباتية. ولكن مثل هذا التراكم يتطلب شروطا خاصة نظرا لأن النباتات الميتة ما تلبث أن تتحلل عند تعرضها الى الجو أو الى بيئات أخرى محملة بالأكسجين. وتعتبر المستنقعات واحدة من البيئات الهامة التى تسمح بتراكم المواد النباتية. وحيث أن مياه المستنقعات الراكدة فقيرة فى الأكسجين، فان التحلل الكامل (التأكسد) للمواد النباتية غير ممكن. وبدلا من ذلك، فان أنواعا خاصة من البكتيريا تهاجم النباتات وتحلل المواد العضوية بها تحللا جزئيا، مما يسمح بتحرر الأكسجين والهيدروجين. وبخروج هذه الغازات يزداد تركيز الكربون تدريجيا. ولا تستطيع البكتيريا اتمام عملية التحلل، لأن الأحماض الناتجة عن النباتات تعمل على قتل البكتيريا.

يكوّن التحلل الجزئى لبقايا النباتات، فى المستنقع غير المشبع بالأكسجين، طبقة من الخثّ. وهو مادة بنية رطبة يمكن رؤية التركيبات النباتية فيها بسهولة. وبقليل من الردم يتغير الخثّ الى اللجنيت. وهو فحم بنى رطب. وبالردم يزداد الضغط كما تزداد درجة الحرارة فى هذه المواد. وتولد الحرارة المرتفعة داخل المواد النباتية مما ينتج عنه ماء وغازات عضوية (المواد المتطايرة). وكلما زاد الثقل فوق هذه المواد كلما ضغطت المياه والغازات وأجبرت على الخروج، فتزيد نسبة الكربون الخالص (المادة الأصلية القابلة للاحتراق). وكلما زاد محتوى الكربون كلما زادت قيمة الفحم كوقود. وخلال الردم يزداد تضاغط الفحم. فمثلا يغير الردم العميق اللجنيت الى فحم أسود أكثر صلابة وأكثر تضاغطا يسمى الفحم القاريّ (البيتومينى). وقد لا تتجاوز طبقة من الفحم القاريّ عشر سمك طبقة الخثّ التى تبدلت عنها.

يعتبر كل من اللجنيت والفحم القاريّ صخورا رسوبية، بينما يعتبر الناتج اللاحق المسمى انثراسيت (وهو فحم أسود شديد الصلابة) من الصخور المتحولة. ويتكون الانثراسيت عندما تتعرض الطبقات الرسوبية للطى والتشكل المصاحب لعمليات بناء الجبال. كما تسبب الحرارة والضغط الناتج عن بناء الجبال، فقدانا اضافيا للمواد المتطايرة والماء مما يؤدى الى زيادة فى تركيز مادة الكربون. ورغم أن للانثراسيت احتراق نظيف كوقود، الا ان كمية تعدينه قليلة نسبيا. وهذا يرجع الى أن الأنثراسيت ليس متوفرا بكثرة وأن استخراجه أصعب وأكثر تكلفة من طبقات الفحم القاريّ المنبسطة.

وقد بقى الفحم وقودا مهماً لعدة قرون. ففى القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين، كان الفحم القوة المحركة للنهضة الصناعية نظرا لوفرته ورخص ثمنه. ويذهب اليوم 70 % من الفحم المستعمل الى توليد الكهرباء. ورغم أن الفحم لا يحتل المرتبة الأولى فى استعماله كوقود فى الوقت الحاضر، الا أن استعماله سوف يزداد مستقبلا. ومما يحتم العودة الى انتاج الفحم تضاؤل شحنات النفط وعدم الاعتماد على استمرارية هذه الشحنات فى بعض الأحيان الى جانب

ارتفاع الأسعار. ومن الممكن التوسع فى انتاج الفحم لأن هناك احتياطيا عالميا ضخما.

ورغم أن الفحم يتمتع بميزة الوفرة الا ان انتاجه واستعماله يشكلان عددا من المشاكل. فيمكن أن يحوّل التعدين بالتجريد المناطق الريفية الى أراض مشوهة قحلة اذا لم يتم القيام بالاستصلاح الجيد والمكلف لارجاع الأرض الى حالتها الطبيعية. ورغم أن التعدين تحت الأرض لا يشوه المنظر السطحى للأرض، الا أنه أكثر تكلفة من حيث الأرواح والضرر بالصحة. وتداهم حوادث التعدين ومرض الرئة السوداء أولئك الذين يعدنون الفحم تحت السطح.

ويخلق تلوث الهواء المصاحب لاحراق الفحم مشكلة كبيرة. اذ يحتوى كثير من الفحم على كميات لا بأس بها من الكبريت الذى يتحول عند احتراقه الى غازات أكسيد الكبريت المزعج. وعن طريق مجموعة من التفاعلات الكيميائية المعقدة فى الغلاف الجوى يتحول الى حامض الكبريتيك الذى يتساقط بعد ذلك على هيئة مطر أو ثلج. وقد يكون لهذا المطر الحامضى آثار بيئية ضارة فى مناطق مترامية. ورغم الخطوات التى اتخذت فى الماضى والتى سوف تتخذ فى المستقبل، فان الفحم لا زال يشكل تهديدا خطيرا للبيئة.

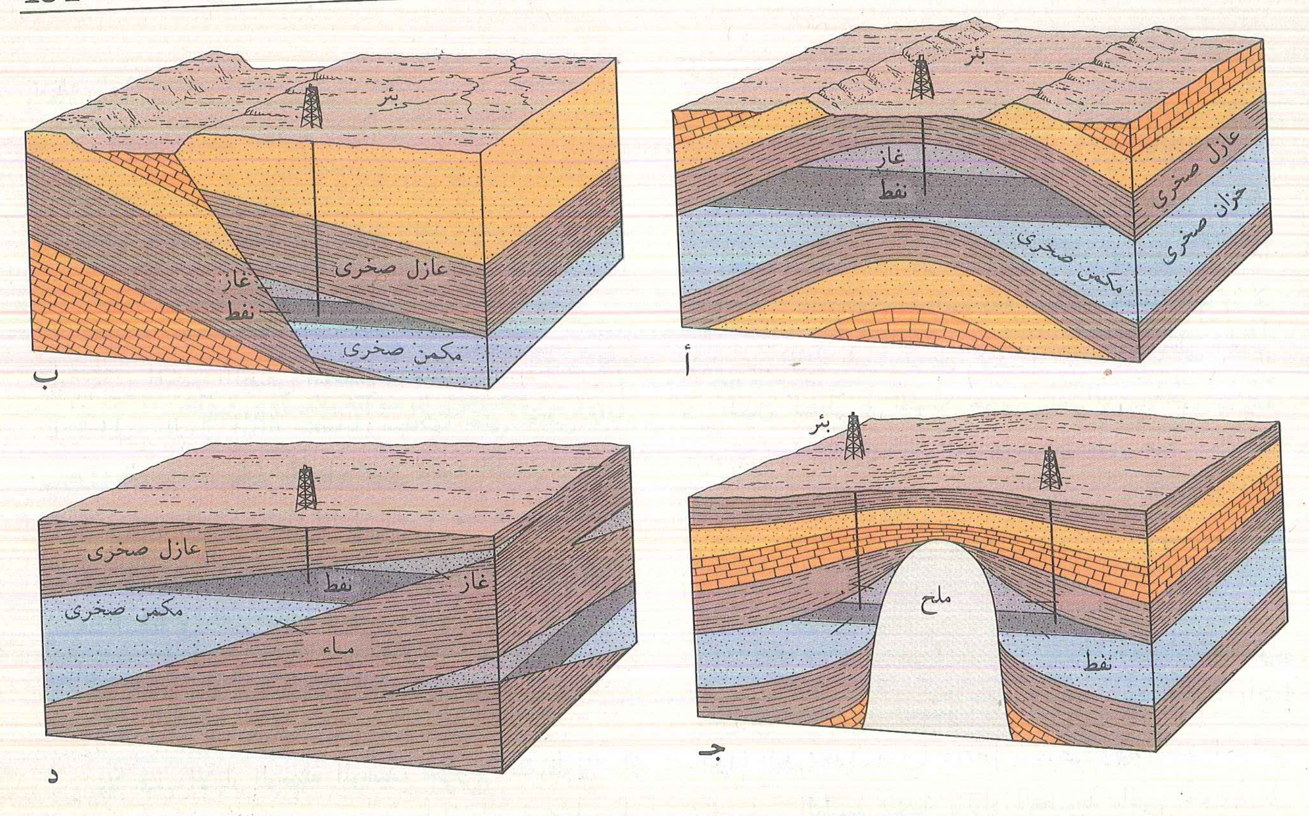
وحيث أنه ليس من المتوقع أن تحول المشاكل المذكورة دون الاستعمال المتزايد لهذا الوقود المهم والوفير فان مجهودات ضخمة يجب أن تبذل لمعالجة المشاكل المصاحبة لتعدين واستعمال الفحم.

النفط والغاز الطبيعى

يوجد النفط والغاز الطبيعى فى ظروف مشابهة وعادة ما يكونان متلازمين. وكلاهما خليط لمواد هيدروكربونية، أى مركبات تتألف من الهيدروجين والكربون. وقد تحتوى أيضا على كميات ضئيلة من عناصر أخرى مثل الكبريت والنيتروجين والأكسجين. ويشبه كل من النفط والغاز الطبيعى، الفحم فى كونهما نواتج حياتية مستمدة من بقايا الكائنات الحية. ولكن الفحم يستمد أساسا من المواد النباتية المتراكمة فى بيئة المستنقعات فوق مستوى سطح البحر، بينما يستمد النفط والغاز الطبيعى من بقايا الحيوانات والنباتات التى لها أصل بحرى.

ويمر تكوّن النفط بعمليات معقدة غير مفهومة تماما. ورغم ذلك نحن نعلم بأن تراكم الرواسب يبدأ فى المناطق المحيطية الغنية ببقايا الحيوانات والنباتات. وتقع هذه التراكمات فى المناطق التى يزداد فيها النشاط الحياتى، مثل المناطق القريبة من الشواطىء. ولكن معظم البيئات البحرية غنية بالأكسجين الذى يسبب تحلل البقايا العضوية قبل أن تدفن تحت الرواسب. ولذلك فان تراكم النفط والغاز الطبيعى غير منتشر انتشار البيئات البحرية التى تدعم النشاط الحياتى المكثف. وبتجاهل هذا العامل المحدد، فان كميات كبيرة من المواد العضوية قد ردمت وعزلت من التأكسد فى كثير من الأحواض الرسوبية البحرية. وبالردم المتزايد عبر ملايين السنين، تحوّل التفاعلات الكيميائية تدريجيا بعض المادة العضوية الأصلية الى المادة الهيدروكربونية السائلة والغازية التى نسميها النفط والغاز الطبيعى.

والنفط والغاز الطبيعى هما مائعان متحركان على خلاف المادة العضوية التى استمدا منها. وتفرز هذه الموائع تدريجيا من الطبقات المتراصة الغنية بالطين، حيث تتجمع فى الطبقات المجاورة المنفذة مثل الحجر الرملى حيث الفتحات التى بين حبيبات الرواسب كبيرة. وتتشبع الطبقات الحاملة للنفط والغاز الطبيعى بالمياه. ونظرا لأن كثافتهما أقل من كثافة الماء، فانهما يصعدان الى أعلى عبر الفراغات المملوءة بالماء فى الصخور المحيطة. واذا لم يكن هناك ما يعمل على ايقاف هذه الحركة الى أعلى فان الموائع سوف تصل فى النهاية الى السطح وسوف تتبخر الأجزاء المتطايرة منها. وتسمى البيئة الجيولوجية التى تسمح بتراكم كميات مناسبة من النفط والغاز بمكمن النفط. ورغم أن هناك عدة تركيبات



شكل 6 ـ 11
مكامن النفط الشائعة. (أ) ـ حنيرة. (ب) ـ مكمن صدعى. (جـ) ـ قبة ملحية. (د) ـ مكمن طبقى. (بتر او اختفاء للطبقات).

جيولوجية تعمل عمل المكمن النفطى، كما سنرى، الا انه لا بد لجميعها من توفر شرطين أساسيين هما: خزان صخرى مسامى ومنفذ يمكن أن يعطى نفطا أو غازا طبيعيا بكميات كافية لجعل عملية الحفر مجزية، وعازل صخرى مثل الحجر الطينى الذى هو غير منفذ بتاتا للنفط والغاز. ويعمل العازل الصخرى على منع النفط والغـاز المتصاعـد الى أعلى من التسرب الى السطح.

ويوضح شكل 6 ـ 11 بعض مكامن النفط والغاز الطبيعى الشائعة. وأحد أبسط المكامن هو الحنيرة، وهو عبارة عن مجموعة من الطبقات المقوسة (شكل 6 ـ 11 أ). فعندما تطوى الطبقات يتجمع النفط والغاز المتصاعدان عند قمة الطية. ونظرا لأن الغاز أقل كثافة فانه يتجمع فوق النفط. وكلاهما يتجمع فوق الماء الأكثر كثافة والذى يشبع الخزان الصخرى. وأحد أكبر الحقول النفـطية بالجـزيرة العـربية، النعلة، وهو عبارة عن مكمن تحدبى وكذلك حقل التيبـوط دووم بولاية وايومنج الأمريكية. وتتكون مكامن الصدوع عندما تنزاح الطبقات بشكل يجعل خزانا من الصخور المائلة قبالة طبقة غير منفذة كما يظهر فى شكل (6 ـ 11 ب). وفى هذه الحالة يتم ايقاف هجرة النفط والغاز عند نطاق الصدع. أما فى منطقة السهـل الساحلى لخليج المكسيك، فتوجـد تجمعات للنفط مصاحبة لقباب الملح. وفى هذه المناطق، التى تتميز بتراكمات سميكة للطبقات الرسوبية، فانه قد اجبرت طبقات الملح الواقعة تحت أعماق كبيرة على الصعود فى شكل أعمدة تحت ضغط الطبقات التى فوقها. وحيث أن النفط

والغاز يصعدان الى أعلى مستوى ممكن، فانهما يتجمعان فى طبقات الحجر الرملى المقلوبة الى أعلى بمحاذاة عمود الملح (شكل 6 ـ 11 جـ). وهناك أيضا ظروف جيولوجية هامة قد تؤدى الى تراكمات قيمة من النفط والغاز الطبيعى تسمى المكامن الطبقية. وتنتج هذه التركيبات الحاملة للنفط مبدئيا من التوزيع الأصلى للترسيب بدلا من التشكلُ التركيبى. وقد تكوّن المكمن الطبقى الموضح فى شكل 6 ـ 11 د، لأن طبقة الحجر الرملى المائلة يتضاءل سمكها حتى تختفى تماما. وعندما تخترق آلة الحفر الغطاء الذى تكونه الصخور العازلة للنفط، يصعد النفط والغاز اللذان تحت ضغط من داخل الخزان الصخرى الى فجوة البئر. وفى الحالات النادرة قد يصعد النفط فى البئر فوق سطح الأرض مدفوعا بضغط الموائع. وفى العادة قد يتطلب رفع النفط الى السطح استعمال المضخات الغاطسة.

ولا تمثل الآبار الوسيلة الوحيدة لخروج النفط والغاز الطبيعى من مكمنه. اذ يوجد ايضا عوامل طبيعية تعمل على ثقب المكامن النفطية. فمثلا، قد تسبب الحركات الأرضية فى احداث تشققات تسمح بتسرب الموائع الهيدروكربونية. كما أن هناك نتائج مشابهة تنجم عن ثقب مكمن بواسطة التعرية السطحية. وكلما كانت الطبقات الصخرية أقدم كلما كان هناك احتمال أكبر لتأثر المكمن بالتشكل أو بالتعرية. وفى الحقيقة، لا تعطى كل أعمار الصخور نفس القدر من النفط والغاز. اذ يأتى أكبر انتاج للنفط من أحدث الصخور عمرا وتلك هى صخور الحين الحديث. أما صخور الحين المتوسط الأقدم عمرا فان انتاجها أقل بكثير ويتلوها كميات أقل بكثير مستمدة من طبقات الحين القديم التى هى أقدم عمرا. ولا يوجد انتاج يذكر من الصخور الأكثر قدما وهى صخور ما قبل الكمبرى.

الطين النفطى

فى الماضى القريب تم اقتراح تطوير مصادر الطين النفطى كحل جزئى لمشكلة التذبذب فى موارد الوقود. وفى الحقيقة، هناك كميات ضخمة من النفط تعد بعيدة المنال لأنها محجوزة فى صخور تسمى بالطين النفطى. وحسب تقدير مصلحة المساحة الأمريكية، هناك أكثر من 3000 بليون برميل من النفط فى الحجر الطينى، اذ يحتوى الطن الواحد من الطين النفطى 38 لترا من النفط الخام. ويعتبر هذا الرقم خياليا لأن الذى يمكن انتاجه فعلا بوسائل التقنية الحالية لا يزيد عن 200 بليون برميل. ويوجد نصف احتياطى العالم من الطين النفطى فى تكوين جرين ريفر الذى يغطى مناطق من ولايات كولورادو ويوتا و وايومنج. ففى هذه المنطقة، يشكل الطين النفطى جزءا من طبقات رسوبية كانت قد تراكمت فى قاع بحيرتين ضحلتين شاسعتين، يرجع تكوينهما الى 50 مليون سنة خلت.

وطين النفط هو صخر رسوبى دقيق الحبيبات يحتوى على كمية من المواد العضوية كافية لانتاج 38 لترا من النفط الخام للطن الواحد على الأقل. ورغم وجود عدد آخر من الصخور الطينية الغنية بالمواد العضوية والتى تحتوى على بعض المواد النفطية الا أن محتوى هذه الصخور من المواد النفطية ردىء لدرجة أنها لا تعتبر من الطين النفطى.

وفى الحقيقة لا يحتوى الطين النفطى على النفط المتعارف عليه، بل يحتوى على مادة هيدروكربونية شمعية تسمى كيروجين. وعند تسخين الكيروجين الى درجة 480°م يتحلل هذا الخليط الصلب المعقد لمركبات الكربون وينتج عنه مواد هيدروكربونية وبقايا كربونية. وبعد التبريد، تتكثف المواد الهيدروكربونية الى سائل يسمى نفط الطين. ويمكن احراق النفط المستمد من الطين فى مراجل، أو يمكن بالتكيّف المناسب (والمكلف) تحسينه لاستعمالات أخرى.

ورغم أن هناك مشاريع تجريبية لاستخراج نفط الطين قائمة لعدة سنوات، الا أنه لا توجد أى محاولات جادة لاستغلال هذا المصدر الكبير استغلالا اقتصاديا. والسبب الرئيسى الذى يمنع تطوير هذا المصدر يرجع الى عدم قدرة الطين النفطى على المنافسة الاقتصادية للمصادر المعروفة.

هذا بالاضافة الى ما يتطلبه انتاج النفط الطينى من كميات هائلة من المياه التى تعد مادة نادرة فى الأماكن ذات المناخ الجاف، والتى يوجد بها الاحتياطى الضخم الغنى بالطين النفطى. كما يشكل التخلص من الكميات الضخمة لنفايات الطين الناتجة عن عملية استخراج النفط منه، مشكلة أخرى خطيرة ومستعصية.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ ما هو وجه المقارنة بين حجم الصخور الرسوبية وحجم الصخور النارية فى القشرة الأرضية؟ هل تتوزع الصخور الرسوبية بالتساوى فيها؟

2 ـ ما هى المعادن الأكثر وفرة فى الصخور الرسوبية الفتاتية؟ لماذا تكون هذه المعادن وفيرة لتلك الدرجة؟

3 ـ ما هو المبدأ الأساسى للتمييز بين أنواع الصخور الرسوبية الحتاتية؟

4 ـ يمكن استعمال كلمة طَفلة بمعنيين. اشرح هذين المعنيين لهذه الكلمة.

5 ـ لماذا يتهشم الحجر الطينى بسهولة بالغة؟

6 ـ ميّز بين الرصيص والبريشة.

7 ـ ميّز بين صنفى الصخور الرسوبية الكيميائية؟

8 ـ ما هى الرواسب التبخرية؟ اذكر اسم صخر من الصخور التبخرية.

9 ـ فى أى حجم من الرواسب تعتبر عملية التراص من عمليات التصخر الهامة؟

10 ـ اذكر ثلاثة مواد لاصقة للصخور الرسوبية. كيف يمكن التعرف على كل منها؟.

11 ـ ما هو المبدأ الأساسى للتمييز بين أنواع الصخور الرسوبية المختلفة؟.

12 ـ ميّز بين النسيج الفتاتى والنسيج غير الفتاتى. ما هو النسيج المشترك بين جميع أنواع الصخور الرسوبية الحتاتية؟

13 ـ ما هى الصفة التى قد تعتبر الأكثر تميزا لجميع الصخور الرسوبية؟

14 ـ ميّز بين الطبقية المتقاطعة والطبقية المتدرجة.

15 ـ كيف يختلف الفحم عن بقية الصخور الرسوبية الحياتية؟.

16 ـ كيف يختلف الفحم القارىّ (بيتومين) عن اللجنيت؟ وكيف يختلف الانثراسيت عن الفحم القارى (بيتومين)؟

17 ـ يتمتع الفحم بميزة الوفرة. ما هى بعض المساوىء التى تصحب انتاج واستعمال الفحم كوقود؟.

18 ـ ما هو مكمن النفط؟ اذكر شرطين مشتركين لكل المكامن النفطية؟

19 ـ كثير من الصخور الطينية الغنية بالمواد العضوية لا تسمى الطين النفطى، لماذا؟

20 ـ رغم أن عدداً من دول العالم بها رواسب ضخمة للطين النفطى، الا أن نفط الطين لا يستغل تجاريا. اشرح ذلك؟

الكلمات الدالة :

تشققات الطين (الوحل)	**mud crack**
تراص	**compaction**
تصخر	**lithification**
تلصيق	**cementation**
حتاتى	**detrital**
رواسب تبخرية	**evaporite deposit**
طبقات	**strata**
صخر خازن	**reservoir rock**
صخر عازل	**cap rock**
صخور رسوبية حتاتية	**detrital sedimentary rocks**
صخور رسوبية كيميائية	**chemical sedimentary**
صخور	**rocks**
طبقات	**beds**
طبقية متدرجة	**graded bedding**
طبقية متقاطعة	**cross bedding**
علامات تموج	**ripple marks**
غير فتاتى	**nonclastic**
فتاتى	**clastic**
مستحاثة	**fossil**
مستوى طبقى	**bedding plane**
مسطح ملحى	**salt flat**
مكمن نفطى	**oil trap**

7



الصخور المتحوّلة


7

التحوّل

عوامل التحوّل

- الحرارة كعامل للتحول
- الضغط كعامل للتحول
- النشاط الكيميائى والتحول

التغيرات النسيجية والمعدنية

الصخور المتحولة الشائعة

- الصخور المتورقة
- الصخور عديمة التورق

تواجد الصخور المتحولة

- التحول على امتداد الصدوع
- تحول التماس
- التحول الشامل

التحول وحركة الألواح

التحوّل

تتضمن عمليات التحول تبديل الصخور السابقة. ويمكن أن تنشأ الصخور المتحولة من صخور نارية أو صخور رسوبية أو صخور متحولة أخرى. والمصطلح المستعمل لهذه العملية هو مصطلح مناسب جدا لأنه يعنى حرفيا تغيرّ الهيئة. وعوامل التغير هذه تشمل: الحرارة والضغط والمحاليل النشطة كيميائيا، أما التغيرات التى تحدث فتشمل النسيج والتركيب المعدنى.

ففى بعض الحالات يكون التغير الذى يطرأ على الصخور المتحولة طفيفا جدا وجزئيا، بحيث تصبح الصخور أكثر تبلّرا ويزداد تراصها، مع احتفاظها بخصائصها الأصلية. أما فى حالات أخرى فان التحول فى خصائص الصخر الأصلية يكون كاملا لدرجة يستحيل معها التعرف على نوع الصخر الأصلى. اذ تختفى جميع الملامح مثل مستويات الطبقات والمستحاثات والثقوب التى كانت موجودة فى الصخور الأصلية. وعلاوة على ذلك فان الصخور عندما تتعرض لعوامل التحول من حرارة وضغط شديدين تصبح لينة وربما تتثنى على هيئة طيات منمقة (شكل 7 ـ 1). ففى بيئات التحول العالية ترتفع الحرارة الى درجة انصهار الصخور، غير أنها تبقى متماسكة فى مراحل التحول المختلفة أما اذا انصهرت نهائيا فانها تدخل فى نطاق النشاط النارى لتصبح صخورا نارية.

شست فيشنو، صخور متحولة يرجع عمرها الى ما قبل الكامبرى كما تظهر فى المضيق الداخلى للأخدود الكبير (جراند كانيون) بأريزونا.

وسبب عملية التحول هو تعرض الصخور الى ظروف تختلف عن تلك التى نشأت فيها، مما يؤثر فى التركيب المعدنى الذى تطرأ عليه تغيرات كيميائية وطبيعية تتلاءم والظروف الجديدة. وتحدث التغيرّات فى أعماق الأرض تحت نطاق التجوية وفوق نطاق الانصهار. وحيث أن نشأة الصخور المتحولة تتم بعيدا عن الأنظار، وهى فى هذا تختلف عن كثير من الصخور الرسوبية وعن بعض الصخور النارية، فان التحول يشكل أصعب المواضيع دراسة بالنسبة للجيولوجيين.

ويحدث التحوّل عادة فى واحدة من ثلاث حالات: الأولى، أثناء بناء الجبال، حيث تتعرض كميات كبيرة من الصخور لضغط وحرارة شديدين مصاحبين لمثل هذا التشكّل واسع النطاق. وقد تكون النتيجة النهائية عبارة عن مناطق شاسعة من الصخور المتحوّلة والتى يقال بأنها قد تعرضت الى **تحوّل اقليمى**. وينتج عن هذه الطريقة أكبر حجم من الصخور المتحولة. والثانية، عندما تكون الصخور ملاصقة أو مجاورة لكتلة من الصهير فى درجة حرارة عالية، فانه يحدث لها تحوّل نتيجة تماسها مع كتلة الصهير الساخنة. وتنتج التغيرّات بصورة رئيسية من جراء درجات الحرارة العالية للصهير، والتى تعمل على تسخين الصخور المجاورة، فينتج عن ذلك صخور متحولة. ويعرف مثل هذا التحول **بتحوّل التماس**. والحالة الثالثة وهى الأقل شيوعا من حالات التحوّل، تتم على امتداد الصدوع. وهنا يتم قطع الصخور وسحقها بفعل تطاحن الكتل الصخرية عند انزلاقها قبالة



شكل 7 ـ 1

صخور ذات طيات منمقة فى جزيرة كاباج بين.

بعضها البعض، الذى يولد حرارة وضغط يعملان على تحوّل الصخور المجاورة للصدع.

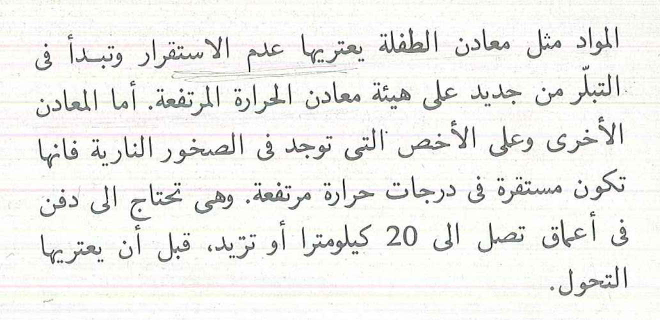
عوامل التحوّل

وكما أشير سابقا، فان عوامل التحوّل تشمل الحرارة والضغط والسوائل النشطة كيميائيا. وخلال عملية التحول تتعرض الصخور عادة الى الثلاث عوامل مجتمعة. ولكن تختلف درجة التحوّل، ومساهمة كل عامل، اختلافا كبيرا من منطقة الى أخرى. ففى التحوّل الخفيف تتعرض الصخور المكونة عند سطح الأرض لحرارة وضغط أكثر بقليل مما هو سائد فى البيئة السطحية، ومن ناحية أخرى، فالتحول الشديد يتم تحت حرارة وضغط قريبين من تلك التى تسبب انصهاراً فى الصخور.

الحرارة كعامل للتحول

لعل من أهم عوامل التحوّل هى الحرارة. فقد تتعرض الصخور المتكونة قرب سطح الأرض الى حرارة شديدة، عندما تخترقها مواد منصهرة آتية من أسفل. ويكون تأثير تحوّل التماس أكثر وضوحا عندما يحدث عند أو قرب سطح الأرض، حيث يكون الفرق شاسعا فى درجات الحرارة بين الصخور المخترِقة التى فى درجة انصهار وبين الصخور المخترَقة. وهنا يحدث شىء للصخور الملاصقة بواسطة الصهير المندفع. وبما أن ذلك يحدث فى أعماق ضحلة، فان بيئة تحوّل التماس توصف بالبيئة شديدة الحرارة وقليلة الضغط وفى هذه الحالات فان الحد الفاصل بين الجسم النارى المخترِق والصخور المتحولة يكون واضحا تماما.

ويمكن أن تتعرض الصخور المتكونة عند سطح الأرض أيضا الى حرارة فائقة عندما تدفن فى أعماق الأرض. تذكّر أن الحرارة تزداد بازدياد العمق بمعدل يعرف بالتدرج الحرارى. ويبلغ متوسط هذه الزيادة فى الجزء العلوى من القشرة 30° م لكل كيلومتر. وكما ذكرنا سابقا فان مواد الأرض تنقل الى أعماق كبيرة عند حواف الألواح المتقاربة. أما عندما تدفن الى عمق عدة كيلومترات فقط، فان بعض



المواد مثل معادن الطفلة يعتريها عدم الاستقرار وتبدأ فى التبلّر من جديد على هيئة معادن الحرارة المرتفعة. أما المعادن الأخرى وعلى الأخص التى توجد فى الصخور النارية فانها تكون مستقرة فى درجات حرارة مرتفعة. وهى تحتاج الى دفن فى أعماق تصل الى 20 كيلومترا أو تزيد، قبل أن يعتريها التحول.

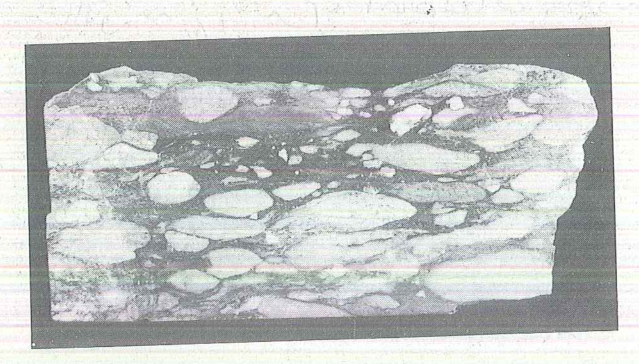
الضغط كعامل للتحوّل

يزداد الضغط مع العمق مثله مثل الحرارة. وتتعرض الصخور عند ردمها لضغط الصخور التى فوقها. فالضغط فى هذه البيئة المحيطة هو مشابه تماما لضغط الهواء حيث تعمل القوة فى جميع الاتجاهات.

وبالاضافة الى الضغط الناشىء عن حمل المواد العلوية، هناك أيضا ضغط يؤثر على الصخور من جراء عمليات بناء الجبال. وهذه القوى المؤثرة اتجاه حيث تنحصر كما لو كانت بين فكى كماشة. وتكون حرارة الصخور العميقة مرتفعة. ولهذا فهى تتصرف بليونة عند تشكلها. وهذا التصرف يفسر قدرتها على الحركة والانحناء فى طيات معقدة ومتنوعة (شكل 7 ـ 2). وخلافا لذلك، فالصخور الباردة القريبة من السطح سوف يعتريها القص فى وجود قوة مشكّلة. ويحدث القص عندما تتكسر الصخور القصفية الى ألواح رقيقة لها القدرة على الانزلاق فوق بعضها البعض. ويمكن تمثيل هذه الظاهرة باستعمال رزمة من ورق اللعب. ويشبه القص الانزلاق الذى يحدث بين الأوراق المختلفة عندما تشد الرزمة بين يديك ويتم تحريك الجزء العلوى بالنسبة للجزء السفلى.

النشاط الكيميائى والتحوّل

تزيد السوائل النشطة كيميائيا التى تحتوى عادة على محاليل مائية متأينة، من عملية التحوّل. ويوجد بعض الماء فى كل الصخور تقريبا. ففى كثير من الصخور الرسوبية، التى تحتوى على معادن الطفلة، يتواجد الماء كجزء من البنية



شكل 7 ـ 2

رصيص متحول. هذه القطع الصخرية التى كانت فى يوم ما مدورة قد استطالت كما لو حشرت بين فكى كماشة.

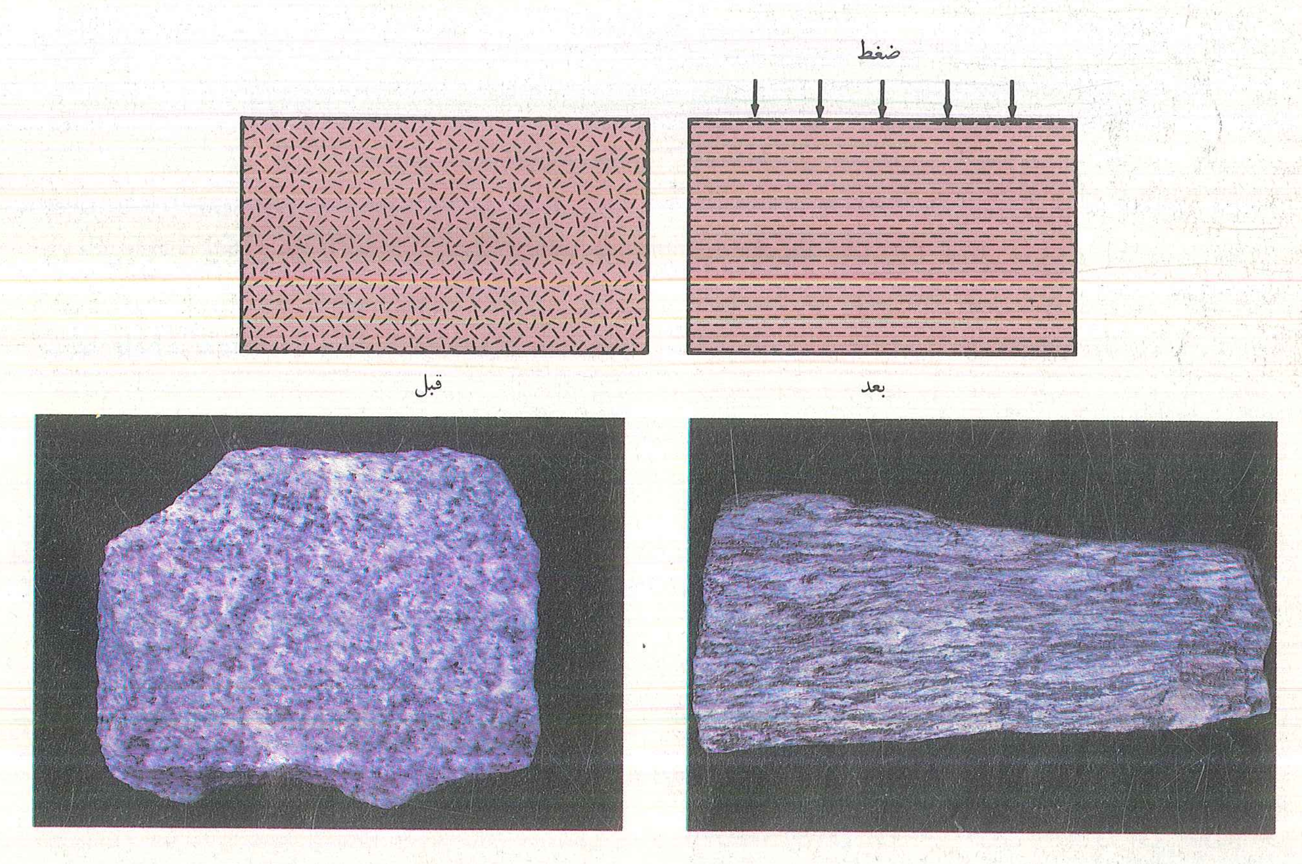
الهيكلية للمعادن وعندما تردم هذه المعادن فى أعماق الأرض، يخرج الماء من الهيكل المعدنى ويصبح فى متناول الاستعمال للمساعدة فى التفاعلات الكيميائية. وعلاوة على ذلك فان الماء عادة ما يملأ الفراغات البينيّة فى معظم الصخور. وتعمل المياه المحيطة بالبلّورات كعامل مساعد لمساعدة انتقال الأيونات. وكما يتوقع تماما، تعتبر المياه الساخنة أنسب من المياه الباردة فى المساعدة على التفاعل الكيميائى. ويمكن مشاهدة التغيرات الكلية التى تحدثها المياه الساخنة بالبيئات القريبة من سطح الأرض. هذا بالاضافة الى أنه على امتداد مرتفعات وسط المحيط، عندما تدخل مياه البحر عبر الصخور الملتهبة، فانها تحوّل معادن البازلت الغامقة الى معادن متحولة مثل السربنتين والتلك.

التغيرات النسيجية والمعدنية

تنعكس درجة التحوّل للصخور المتحوّلة فى النسيج والتركيب المعدنى. وعندما تتعرض الصخور الى تحوّل، ذو درجة خفيفة جدا، فانها تصبح أكثر تراصا وأكثر اكتنازا. ومن الأمثلة المعروفة، الصخر المتحوّل المعروف بالأردواز، الذى يتكون من تراص الحجر الطينى. تذكّر أن الحجر الطينى يتكون من حبيبات دقيقة جدا لمعادن الطفلة والتى هى على

درجة كبيرة من التراص. وبالاضافة الى التراص، فان الضغط يسبب التبلّر فى حبيبات المعادن الموجودة فى الصخور. ومن المعتقد أن الماء يلعب دورا مهما جدا فى عمليات اعادة التبلّر. ويعمل الماء الساخن كعامل مساعد فى انتقال الأيونات. وتتبلّر بعض المعادن فى اتجاهات مفضلة، مثل المايكا التى لها بنية صفائحية، والهورنبلند الذى له بلورات ذات استطالة. وتكون الاتجاهات الجديدة الى حد ما عمودية على اتجاه القوة الضاغطة. ويعطى المعدن الناتج للصخور مظهرا مطبقا أو محزّما وهو ما يسمى بالتورق (شكل 7 ـ 3).

وتوجد أنواع مختلفة من التورق يتوقف كل نوع منها على درجة التشكل الى حد كبير. فمثلا، أثناء تحوّل الحجر الطينى الى أردواز، تتبلر معادن الطفلة من جديد، والتى هى مستقرة عند سطح الأرض، الى نتف ضئيلة لمعدن المايكا الذى يعتبر مستقرا عند درجة حرارة وضغط مرتفعين. وعلاوة على ذلك فانه يحدث أثناء التبلّر أن تصبح هذه البلورات الدقيقة لمعدن المايكا مصطفة، بحيث تكون أوجهها المسطحة متوازية تقريبا. ونتيجة لذلك يمكن قصم الأردواز بسهولة على امتداد هذه الطبقات لحبيبات المايكا للتفريق بينه وبين الانفصام الذى يظهر فى المعادن (شكل 7 ـ 4).



شكل 7 ـ 3

تحت ضغط التحول، يعاد توجه بعض الحبيبات المعدنية إذ تأخذ اتجاها متعامدا على اتجاه الضغط ويعطى التوجيه الناتج للحبيبات المعدنية الصخور نسيجا متورقا. فاذا تعرض صخر نارى خشن الحبيبات (جرانيت) كما فى يسار الصورة الى تحول شديد، فقد ينتهى الى صخر مشابه للصخر المتحول (نايس) كما فى يمين الصورة .



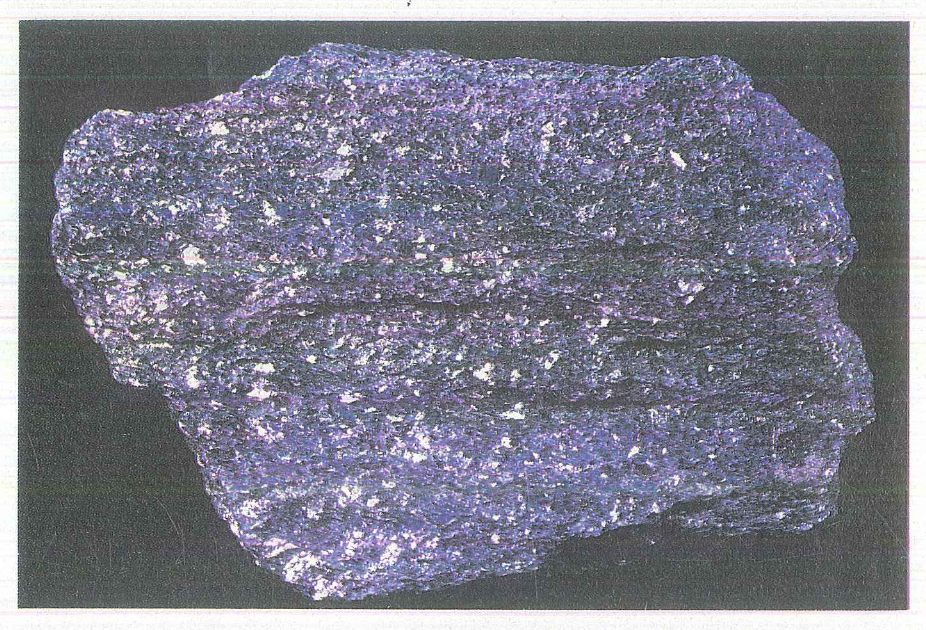
شكل 7 ـ 4

إنفصام صخرى فى الشيست.

وبما أن نتف معدن المايكا المكونة للاردواز ضئيلة جدا، فانه لا يمكن رؤية التورق فى الأردواز. وبما أن التورق الصخرى يظهر فى الأردواز بوضوح مما يدل على اصطفاف معادنه، فانه يمكن اعتبار الأردواز صخرا متورقا.

وتحت ضغط مرتفع ودرجة حرارة عالية تنمو حبيبات المايكا الضئيلة جدا الموجودة فى الأردواز فى أحجامها عدة أضعاف. وتعطى بلورات المايكا هذه، والتى يبلغ قطرها حوالى سنتيمترا واحدا، مظهرا صفائحيا أو قشريا للصخور. ويسمى هذا النوع من التورق بالتورق المنقسم. كما تسمى الصخور التى لها هذا النسيج بصخور الشيست (أى المنقسم). وتوجد أنواع عدة من الشيست وهى تسمى حسب محتواها المعدنى، وأكثرها انتشارا هو شيست المايكا الذى يحتوى عادة على معدن الموسكوفيت أو البايوتيت أو على كليهما معا (شكل 7 ـ 5).

وأثناء عمليات التحوّل الشديد يمكن أن يكون انتقال الأيونات كافيا ليسبب فصل المعادن عن بعضها. وشكل 7 ـ 3 يوضح مثالا للصخور المتحوّلة التى يظهر فيها فصل المعادن عن بعضها. لاحظ أن المعادن الغامقة قد انفصلت عن المعادن الفاتحة معطية مظهرا محزما. وتسمى الصخور المتحوّلة التى تمتلك هذا النسيج نايس، وهى شائعة



شكل 7 ـ 5
شيست المايكا وهو صخر متحول شائع مؤلف من قشر المايكا اللماعة.

جدا. وينشأ صخر النايس عادة عن تحوّل الجرانيت أو الدايوريت، ولكنه يمكن أن ينشأ عن صخور أخرى، مثل الجابرو أو حتى عن طريق التحول الشديد للحجر الطيني. ورغم تحزم النايس، فانه لا ينفصم فى اتجاهات موازية لاصطفاف البلّورات بالسهولة التى ينفصم بها الأردواز.

ولا تملك كل الصخور المتحوّلة نسيجا متورقا. اذ توصف تلك الصخور بأنها عديمة التورق. فالصخور المتحوّلة التى تتألف من معدن واحد فقط، مكون من بلورات متساوية الأبعاد، يتعذّر رؤية التورق بها. فمثلا عندما يتحوّل الحجر الجيرى، دقيق البلورات المكون من الكالسيت، تتجمع بلورات الكالسيت الصغيرة لتكوّن بلورات متماسكة كبيرة نوعا. ويبدو الصخر الناتج شبيها بصخر نارى خشن الحبيبات. ويسمى هذا الصخر المتحول المساوى للحجر الجيرى بالرخام. ولو أن الرخام يعتبر من الصخور عديمة التورق الا أنه قد يظهر بعض التسطّح والتوازى فى بلوراته عند فحصه مجهريا. هذا بالاضافة الى أن بعض أنواع الحجر الجيرى تحتوى على غشاءات رقيقة من معادن الطفلة، وهذه قد يعتريها تمزق أثناء عمليات التحول. وتبدو هذه الشوائب غالبا على صورة خطوط أو أحزمة متعرجة من مواد غامقة منسابة خلال الرخام. وعلى كل حال هذه الملامح لا تعد تورقا.

وعند تحوّل الحجر الطينى الى اردواز رأينا أن معادن الطفلة تتبلّر لتكوّن بلورات من المايكا. وفى معظم الحالات، بما فيها هذا المثل، لا يطرأ أى تغيرّ على التركيب الكيميائى أثناء التبلّر، بل ان المعادن المتواجدة والأيونات الموجودة فى الماء تتحد من جديد لتكوّن معادن جديدة مستقرة فى البيئة الجديدة. ومن الأمثلة المعروفة تكوّن معدن الوولاستونيت. ينشأ هذا المعدن عندما يتعرض الحجر الجيرى (كا ك أ$_3$) المحتوى على رمال السليكا فى هيئة معدن الكوارتز (س أ$_2$) الى حرارة شديدة أثناء عمليات التحوّل بالتماس. وتتفاعل بلّورات الكالسيت كيميائيا مع بلّورات الكوارتز لتكوّن معدن الوولاستونيت (كا س أ$_3$).

أما فى بعض الحالات فانه تدخل مواد جديدة أثناء عمليات التحوّل. فمثلا، تتغير صخور المنطقة المجاورة لجسم كبير من الصهير بواسطة محاليل المياه الحارة الغنية بالحديد والمتحررة أثناء المراحل الأخيرة من التبلّر. وتتراكم كثير من

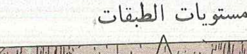
الخامات المعدنية بواسطة الترسيب من محاليل المياه الحارة. كما أن مياه البحر المتسربة للقشرة المحيطية حديثة التكوين سوف تحتوى على عدد من الأيونات النشطة التى تتفاعل كيميائيا مع الصخور المجاورة. وتكونت أغنى مناطق خامات النحاس بهذه الطريقة.

وباختصار، فان عمليات التحوّل تسبب كثيرا من التغيّرات فى الصخور بما فى ذلك الزيادة فى كثافة الصخور، ونمو البلورات الكبيرة وتغيّر اتجاه الحبيبات المعدنية (الذى ينشأ عنه مظهر محزم يسمى بالتورق)، واستبدال المعادن المتكونة فى درجة حرارة منخفضة بأخرى متكونة فى درجات حرارة مرتفعة، واستقطاب الأيونات مستحدثة بذلك معادن جديدة قد يكون لبعضها أهمية اقتصادية.

الصخور المتحولة الشائعة

الصخور المتورقة

الأردواز هو صخر دقيق التورق مكون من نتف المايكا الدقيقة. ومن أهم خصائصه الصخرية وجود الانفصام الصخرى الممتاز. وقد جعلت هذه الخاصية من الأردواز صخرا صالحا جدا للاستعمال فى تبليط الأسقف والأرضيات وفى السبورات وطاولات البليارد. وينشأ الأردواز من التحول الخفيف للحجر الطينى. وقليلا ما ينشأ من تحول الرماد البركانى. ويتخذ الأردواز عدة ألوان حسب تركيبه المعدنى. فالأردواز (الكربونى) الأسود يحتوى على مواد عضوية. أما الأردواز الأحمر فيحصل على هذا اللون من أكسيد الحديد.

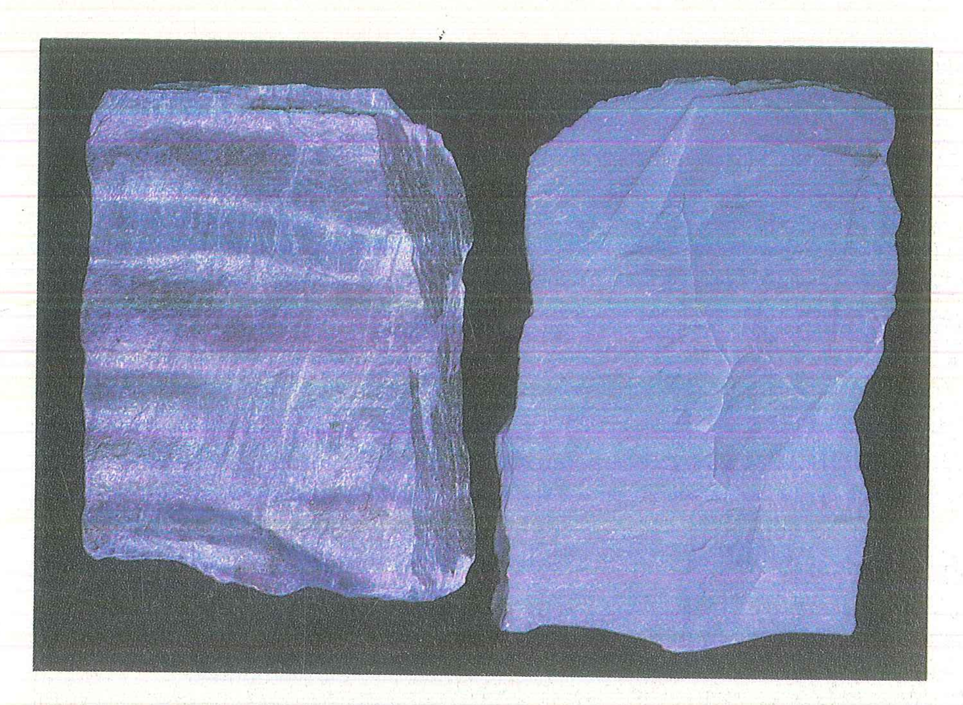






شكل 7 ـ 6

رسم وصورة يوضحان العلاقة بين الانفصام الاردوازى والمستويات الطبقية الأصلية.

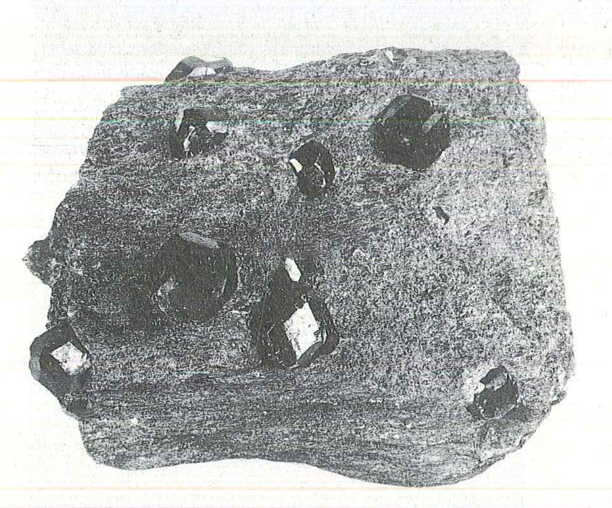


شكل 7 ـ 7
يمكن تمييز الفيلليت من الأردواز بواسطة لمعان الفيلليت المتوقد.

ويحتوى الأردواز الأخضر على معدن الكلوريت وهو معدن شبيه بالمايكا ينشأ من تحول السليكات الغنية بالحديد. ونظرا لتكوّن الأردواز خلال درجات التحوّل الخفيف فانه كثيرا ما يحتفظ بالأسطح الطبقية الأصلية. ومع ذلك فان اتجاهات الانفصام الصخرى فى الأردواز غالبا ما تكون عمودية على الطبقات الرسوبية الأصلية (شكل 7 ـ 6). ولهذا فان الأردواز ينفصل عبر الأسطح الطبقية بعكس الحجر الطينى الذى ينفصل على امتداد هذه الأسطح.

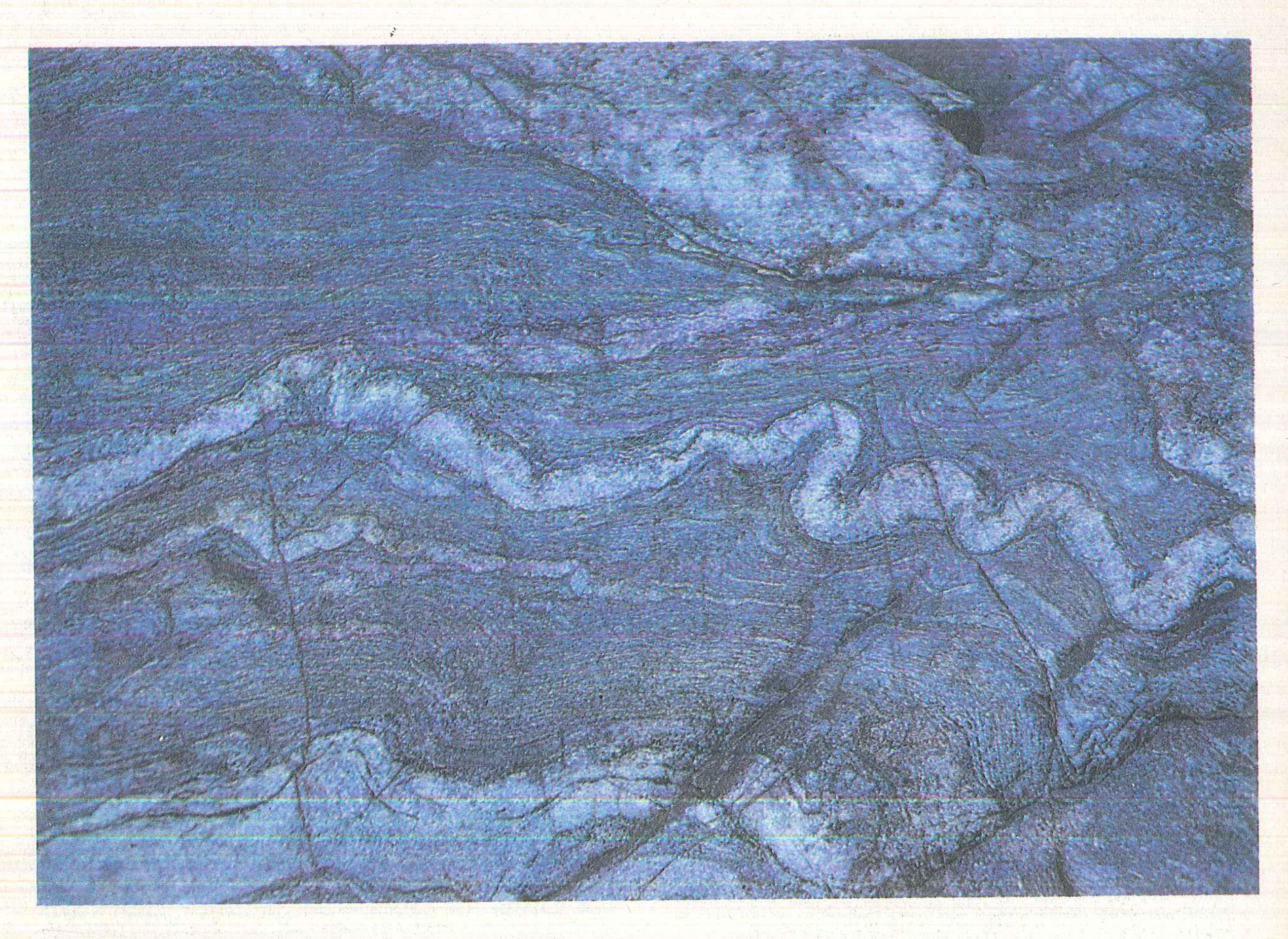
ويمثل الفيلاّيت تدرجا بين الأردواز والشيست. ومعادنه الصفائحية هى أكبر من معادن الأردواز ولكنها لم تبلغ الحجم الذى تمكِّن من التعرف عليها. ومع أن الفيلاّيت شبيه جدا بالأردواز، الا أنه يمكن تمييزه بواسطة لمعان سطحه (شكل 7 ـ 7). ويظهر فى الفيلاّيت الانفصام الصخرى بوضوح، كما أنه يحتوى على بلورات دقيقة من معدنى الكلوريت والموسكوفيت.

أما الشيست فهو صخر متحول متميز. وهو شائع شيوع صخر النايس. ويحتوى الشيست اصطلاحيا على 50 % من



شكل 7 ـ 8
الشيست الجارنيتى المايكى.

المعادن الصفائحية. وهى عادة ما تكوّن معادن الموسكوفيت والبايوتيت. ومثل الأردواز، فان معظم الصخور المتحول منها الشيست هى عبارة عن الحجر الطينى غير أنه فى حالة الشيست تكون درجة التحول أشد. واذا كان الصخر



شكل 7 ـ 9

نايس مفتول يوجد فى قاع الأخدود الكبير (جراند كانيون) بنهر كولورادو.

الأصلى يحتوى على السليكا فان ذلك يظهر على هيئة أحزمة رقيقة من الكوارتز وكذلك الفلسبار.

وتسمى أنواع الشيست حسب تركيبها المعدنى. فالتى تحتوى على الموسكوفيت والبايوتيت مع نسبة قليلة من السليكا تسمى بالشيست المايكى. وحسب درجة تحول شيست المايكا فانه يحتوى على معادن نادرة وهذه ظاهرة خاصة تنفرد بها الصخور المتحولة. وبعض هذه المعادن النادرة تشمل معادن الجارنيت والستوروليت والسيليمانيت (شكل 7 ـ 8). وتحتوى بعض أنواع الشيست على الجرافيت الذى يستعمل فى رصاص الأقلام، وفتائل الجرافيت وأغراض التشحيم. بالاضافة الى ذلك فإن صخور الشيست قد تحتوى على كميات من معدن الكلوريت أو التلك، وفى هذه الحالة تسمى بشيست الكلوريت أو شيست التلك حسب الحالة. وينشأ كل من شيست الكلوريت وشيست التلك عندما تتعرض الصخور ذات التركيب البازلتى الى عمليات التحوّل.

وتطلق كلمة نايس على أنواع الصخور المتحولة ذات التورق، والتى تحتوى على معادن حبيبية فى معظمها بخلاف المعادن الصفائحية. وأكثر المعادن تواجدا فى صخور النايس هو معدن الكوارتز، وفلسبار البوتاسيوم والصوديوم. ويمكن



شكل 7 ـ 10
الرخام، صخر متبلر ينشأ عن تحول الحجر الجيرى.

القول بأنه توجد كميات أقل من معادن الموسكوفيت والبايوتيت والهورنبلند فى صخور النايس. وانفصال معادن السليكات الفاتحة من معادن السليكات الغامقة يعطى هذا النوع من الصخور المتحولة نسيجا متميزا. ولذلك فان معظم صخور النايس تتألف من أحزمة متعاقبة من نطاقات غنية بالفلسبار الأبيض أو الأحمر مع طبقات من المعادن الغامقة. (شكل 9 ـ 7). وبعض أنواع صخور النايس يمكن أن تنفصم بسهولة على امتداد طبقات المعادن الصفائحية، ولكن معظمها ينكسر بطريقة غير منتظمة مثل بقية الصخور المتبلرة.

وعادة ما تمتلك صخور النايس تركيب الجرانيت لنشأتها من الجرانيت أو أحد الصخور الخشنة المساوية له. كما أنها قد تنشأ من التحوّل الشديد لصخور الحجر الطينى. وفى هذا السياق فان النايس يمثل الحلقة الأخيرة فى سلسلة الصخور المتدرجة من الحجر الطينى الى الأردواز الى الفيلايت الى الشيست الى النايس. وتشبه صخور النايس صخور الشيست فى احتوائها على بلورات كبيرة من معادن نادرة مثل الجارنيت والستوروليت. وعندما يغلب فى الصخور المحزمة المعادن الغامقة مثل تلك الموجودة فى البازلت فانها تسمى صخور الأمفيبوليت. وهذا الاسم مستمد من معدن الأمفيبول.

الصخور عديمة التورق

الرخام هو صخر خشن البلورات، مستمد من الحجر الجيرى أو من الحجر الدولوميتى (شكل 7 ـ 10). وعند فحص عينة من الرخام نجد أن بلوراتها تشبه تماما الحجر الجيرى المتبلر. والرخام النقى، مثل الثلج، ويحتوى فقط على معدن واحد هو الكالسيت فى هذه الحالة. ونظرا لنقاء لونه ولكونه قليل الصلابة نوعا (صلابة 3)، فان الكثيرين يفضلون استعماله فى البناء. ويحضى الرخام الأبيض باهتمام خاص لكونه الصخر المفضل الذى تنحت منه النصب التذكارية والتماثيل.

ونظرا لاحتواء الصخور الأصلية على شوائب، فانه توجد عدة أنواع من الرخام. فقد يكون لون الرخام ورديا أو رماديا أو أخضرا أو حتى أسودا. هذا بالاضافة الى أن تحوّل الحجر الجيرى غير النقى قد ينتج عنه عدد من المعادن

النادرة التى تشمل الكلوريت والمايكا والجارنيت، وغالبا الولاستونيت. وعندما ينشأ الرخام من الحجر الجيرى المتداخل مع الحجر الطينى فان مظهره سيكون محزما. وكثيرا ما ينفصل الرخام على امتداد هذه الأسطح الطبقية مبرزا معادن المايكا التى تبلّرت من المعادن الطفلية. وتحت ظروف التشكل العالية فان أحزمة الرخام تكون ملوّكة تماما معطية الصخر مظهرا فنيا مميزا.

أما الكوارتزيت فهو صخر متحوّل شديد الصلابة ينشأ عادة من معدن الكوارتز (المرو) فى الحجر الرملى. وتحت درجات التحوّل المعتدل أو الشديد تندمج حبيبات الكوارتز مع بعضها. ويكون التبلّر كليا، لدرجة أنه عندما ينكسر الكوارتز فانه ينقسم خلال حبيبات الكوارتز الأصلية بدلا من انقسامه بين الحبيبات. وفى بعض الحالات يحتفظ الكوارتز بالملامح الرسوبية مثل الطبقات المتقاطعة مما يعطى الصخر مظهرا محزما.

ورغم أن لون الكوارتزيت النقى أبيض، فهو غالبا ما يحتوى على لون أكسيد الحديد الذى يعطيه لونا يتراوح بين الوردى والأحمر. وقليلا ما يحتوى الكوارتزيت على نسبة مئوية بسيطة من المعادن الغامقة مما يعطيه لونا رماديا.

والكوارتزيت يشبه الرخام فى احتوائه على معدن واحد، وفى تكوينه لبلّورات متساوية الأبعاد. وتبعا لذلك فهو خال من التوازى فى حبيبات المعادن ونتيجة لذلك فهو عديم التورق.

تواجد الصخور المتحولة

تذكّر أن الصخور المتحولة تنشأ غالبا فى أحد البيئات الثلاثة: على امتداد الصدوع، أو فى مواقع التماس مع كتل الصخور النارية، أو أثناء العمليات النشطة المصاحبة لبناء الجبال.

التحول على امتداد الصدوع

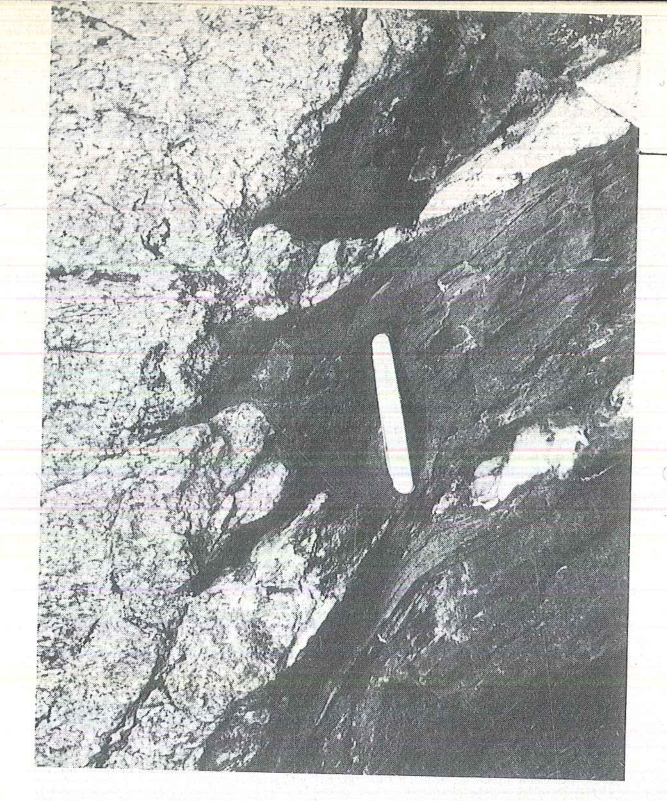
عندما تحدث الصدوع قرب سطح الأرض فان الضغط وحرارة الاحتكاك الناتجة عن امتداد منطقة الصدع، تكوّن صخورا قليلة التماسك مؤلفة من قطع مكسرة ومشوهة. وتسمى هذه الصخور بريشة الصدوع اذا كانت مكونة من قطع مزوّاة. أما الصخور المتحولة الناتجة عن امتداد الصدوع فى أعماق الأرض فانها تشبه الى حد كبير الصخور الناشئة بالعمليات التحولية الأخرى. ولهذا فإنه لا يمكن التعرف على نشأتها عن طريق الفحص العادى.

وتعتبر الصخور المتحوّلة الناشئة عن امتداد الصدوع غير ذات أهمية اذا ما قورنت بكمية الصخور المتحولة الناشئة من النوعين الآخرين، ورغم ذلك فان هذه الصخور المبرغلة أو المحببة، تعتبر مهمة فى بعض المواقع. فمثلا، يوجد على امتداد فالق سان اندرياس بكاليفورنيا نطاق من بريشة الصدوع وصخور مصاحبة تمتد مسافة 1000 كيلومتر وبعرض 3 كيلومترات.

تحول التماس

يحدث تحول التماس عندما تمس الصخور المنصهرة صخورا باردة. ويمكن التعرف بسهولة على الصخور المعرضة لتحول التماس عندما تكون قرب سطح الأرض، حيث يكون هناك فرق كبير فى درجات الحرارة بين الصهير والصخور المحيطة به (شكل 7 ـ 11). وليس هناك من شك فى أن تحول التماس يلعب دورا نشطا فى أعماق الأرض، ولكن التغيرات العامة التى يسببها التحول الشامل قد تطمس آثاره.

وأثناء تحول التماس هناك نطاق، يسمى بالأذينة، يحيط بالصهير الذى يحتل المكان. فيكون للأجسام الصغيرة المقتحِمة مثل الجذة الموافقة أو الجذة القاطعة، أذينات لا يزيد سمكها عن بضعة سنتيمترات. أما الأجسام النارية الكبيرة مثل الباتوليت واللاكوليت فتكوّن نطاقات من



شكل 7 ـ 11
منظر مقرب لنطاق فاصل حيث اقتحمت صخور نارية فاتحة اللون الصخور المضيفة ذات اللون الغامق وتسببت فى تحولها.

الصخور المتحوّلة يبلغ سمكها عدة كيلومترات (شكل 7 ـ 12). وتتألف هذه الأذينات الكبيرة من نطاقات متحولة محددة. فقرب جسم الصهير يمكن أن تنشأ معادن الحرارة العالية، مثل الجارنيت، بينما تنشأ معادن الحرارة المنخفضة مثل الكلوريت بعيدا عنه. ويتوقف حجم الأذينة الناتجة عن التركيب المعدنى للصخور المجاورة وعلى تواجد الماء بالاضافة الى حجم جسم الصهير المقتحم. وفى الصخور النشطة كيميائيا مثل الحجر الجيرى، تمتد منطقة التأثر الى مسافات تبعد 10 كيلومترات أو أكثر من الجسم النارى. وفى هذه الحالة فان تواجد معادن مثل الجارنيت والولاستونيت يحدد منطقة التحول.

ومعظم صخور تحول التماس هى عبارة عن صخور دقيقة الحبيبات، مكتنزة وقوية ذات تنوع فى تركيبها الكيميائى. فمثلا، خلال تحول التماس تنصهر معادن الطفلة كما لو كانت قد وضعت فى فرن. ويمكن أن ينشأ عنها صخر صلب دقيق



شكل 7 ـ 12
تتكون الطبقة الغامقة المسماة بالسقف المعلق من صخور المنطقة المتحولة الملاصقة للجزء العلوى من كتلة صخور نارية. وتدل كلمة السقف المعلق على أنه كان فى يوم ما سقفا لغرفة صهير.

الحبيبات لا يختلف عن القيشانى. وحيث أن الضغط الموجه ليس عنصرا مهما فى تكوين هذه الصخور، فانها عادة ما تكون عديمة التورق. ويطلق اسم هورنفلس على أنواع كثيرة من الصخور المتحولة بطريقة التماس، عديمة التورق.

وعندما تدخل كتل نارية كبيرة فى تحوّل التماس، فان محاليل المياه الحارة التى تنشأ داخل الصهير تستطيع أن تنتقل لمسافات بعيدة. وأثناء انسياب هذه المحاليل عبر الصخور المجاورة، فان التفاعلات الكيميائية تعمل معها على اتمام عمليات التحول. هذا بالاضافة الى أن خامات لمعادن فلزية مختلفة، يعتقد بأنها تنتج عن دخول الأيونات الفلزية، والتى مصدرها محاليل المياه الحارة. وتشمل هذه التجمعات خامات للنحاس والخارصين والرصاص والحديد والذهب.

التحول الشامل

تنشأ معظم الصخور المتحولة أثناء عمليات التحول الشامل. وكما ذكر آنفا فان عمليات التحول الشامل تغطى مساحات شاسعة. وهى تصاحب عمليات بناء الجبال. فأثناء هذه العمليات يتم الضغط على جزء كبير من القشرة الأرضية ويزداد سمكها. وتنشأ عن الزيادة فى سمك القشرة الأرضية جبال تقف شاهقة فوق مستوى سطح البحر. ورغم أن هناك مواد قد رفعت الى ارتفاعات شاهقة أثناء عمليات بناء الجبال، فان كميات مساوية من الصخور لا بد أن تنصاع الى أسفل حيث يتم تعرضها لحرارة وضغط شديدين. وهناك فى «عروق» الجبال تحدث أشد عمليات التحول. فقد تصل حرارة بعض الصخور المتحولة الى درجة الانصهار فتكوّن صهيرا. ويصعد الصهير الناتج الى أعلى بفعل كونه أقل كثافة من الصخور المحيطة به. وعندما يصل الصهير قرب سطح الأرض فانه يسبب تحوّل التماس فوق منطقة التحوّل الشامل. ولهذا فان العمود الفقرى للسلاسل الجبلية يحتوى على صخور مقتحمة تحيط بها صخور متعرضة للتحول الشديد. وعندما ترفع الجبال فان عوامل التعرية تعمل على نقل المواد العلوية لتظهر تحتها الصخور النارية والمتحولة التى تشكل العمود الفقرى للسلاسل الجبلية.

وحيث أن صخور التحوّل الشامل هى من نتاج الضغوط الاتجاهية، فانها عادة ما تكون متورقة. هذا بالاضافة الى أنه يوجد تدرج فى شدة التحوّل بمنطقة التحوّل الشامل. فعند الانتقال من منطقة التحوّل الخفيف الى منطقة التحوّل الشديد فانه يمكن ملاحظة التغيرّات فى التركيب المعدنى والنسيج الصخرى.

ويمكن استعمال الصخور الرسوبية المتمثلة فى الحجر الطينى كمثال مبسط لتدرج عمليات التحوّل والذى ينتج عنه الأردواز أثناء عمليات التحوّل الخفيف. أما عندما يرتفع الضغط ودرجة الحرارة بمقدار أكبر فان المايكا الموجودة فى الشيست تتبلّر الى معادن أخرى مثل الفلسبار والهرنبلند وبذلك ينشأ النايس.

وبالاضافة الى التغيرّات التى ذكرت، هناك تغيرّات أخرى فى التركيب المعدنى يمكن ملاحظتها عندما ننتقل من مناطق التحول الخفيف الى مناطق التحول الشديد. ويوضح شكل (7 ـ 13) الانتقال النموذجى فى التركيب المعدنى الذى ينتج عن التحوّل الشامل للحجر الطينى. وأول معدن يتكوّن فى الأردواز هو معدن الكلوريت والذى تحل محله تدريجيا مقادير أكبر من معدنى الموسكوفيت والبايوتيت كلما اتجهنا من منطقة التحوّل الخفيف الى منطقة التحوّل الشديد. سوف يحتوى شيست المايكا المكوّن تحت ظروف أشد على بلورات الجارنيت والستوروليت. أما عندما تقترب درجات الحرارة والضغط من نقطة الانصهار، فانه يمكن العثور على بلّورات معدن السيليمانيت فى صخور الشيست والنايس. ويمثل معدن السيليمانيت درجات التحول الشديد وهو يستعمل فى صناعة القيشانى المقاوم للحرارة. والمستعمل فى تبطين شمعات الاشعال.

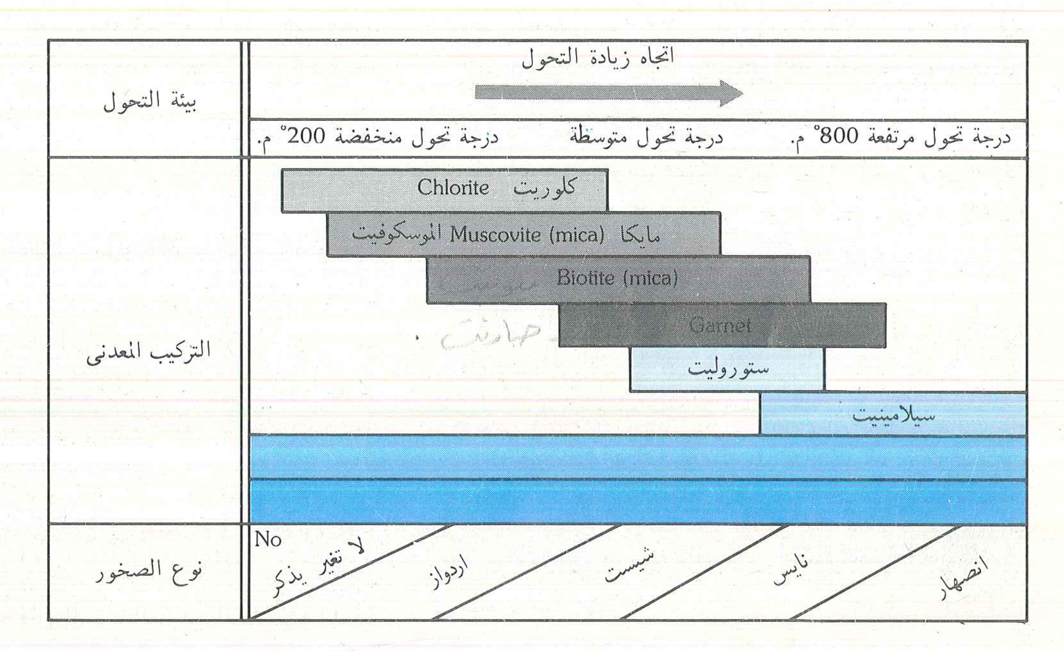
وبدراسة الصخور المتحوّلة واجراء التجارب المعملية عرف الباحثون أن لبعض المعادن فائدة كبيرة فى الدلالة

على بيئة التحوّل التى تكونت فيها. وباستعمال هذه **المعادن الدالة** يفرق الجيولوجيون بين النطاقات المختلفة للتحوّل الشامل. فمثلا، ينتج معدن الكلوريت عند درجات حرارة منخفضة نسبيا، حوالى 200° م (شكل 7 ـ 13). ومن جهة أخرى فان معدن السيليمانيت يتكون من بيئات متطرفة حيث تزيد درجةالحرارة عن 600° م. وبتحديد مواقع المعادن الدالة على الخريطة، فان الجيولوجيين يرسمون فى الواقع النطاقات المختلفة لدرجات التحوّل.

وفى البيئات المتطرفة، حتى الصخور شديدة التحوّل تكون عرضة للتغير. وفى البيئات قليلة الضغط والتى تزيد فيها درجات الحرارة عن 800° م فان الشيست والنايس، اللذان يساوى تركيبهما الكيميائى تركيب الجرانيت، يبدآن فى الانصهار. ولكن تذكّر من مناقشتنا للصخور النارية أن المعادن لا تنصهر فى درجة واحدة فالسليكات فاتحة اللون مثل الكوارتز وفلسبار البوتاسيوم عادة ما تنصهر أولا. بينما تبقى السليكات الغامقة متصلبة والتى من أمثلتها الأمفيبول والبايوتيت. واذا ما بُرد هذا الصخر المنصهر جزئيا، فان الأحزمة الفاتحة سوف تحتوى على صخور نارية متبلّرة بينما تحتوى الأحزمة الغامقة على المواد المتحولة التى لم تنصهر. ويقع هذا النوع من الصخور فى الدائرة الانتقالية بين الصخور النارية الحقيقية والصخور المتحولة، وهى التى تعرف **بالمغماتيتات** (شكل 7 ـ 14).

التحول وحركة الألواح

يبدو أن معظم المعلومات الحالية عن التحول تتفق مع طبيعة الحركات الأرضية كما تصورّها لنا نظرية تحرك الألواح. ففى هذا النموذج تقع عمليات بناء الجبال وعمليات التحوّل المصاحبة لها على امتداد النهايات المتقاربة، حيث تتحرك كتل من الغلاف الصخرى نحو بعضها البعض (شكل 7 ـ 15). ففى هذه المواقع تعمل القوى التضاغطية على عصر وتشكيل الألواح المتقاربة والرواسب التى تجمعت على امتداد حواف القارات. ويفسر



شكل 7 ـ 13

الانتقال النموذجى بين المعادن الذى ينتج عن التحول التدريجى للحجر الطينى.



شكل 7 ـ 14

المغماتيت. الصخور فاتحة اللون هى عبارة عن صخور نارية متكونة من الكوارتز والفلسبار بينما تعود الصخور الغامقة الى اصل تحوُّلى.

نموذج تحرك الألواح أيضا النشاط النارى المصاحب لبناء الجبال. فعند المناطق المتقاربة تغوص المواد الى أعماق تكون فيها درجة الضغط ودرجة الحرارة مرتفعتين. وينتج عن الانصهار الناتج لبعض المواد الغائصة صهير ينتقل الى أعلى ليتبلر فى لب الكتل الجبلية.

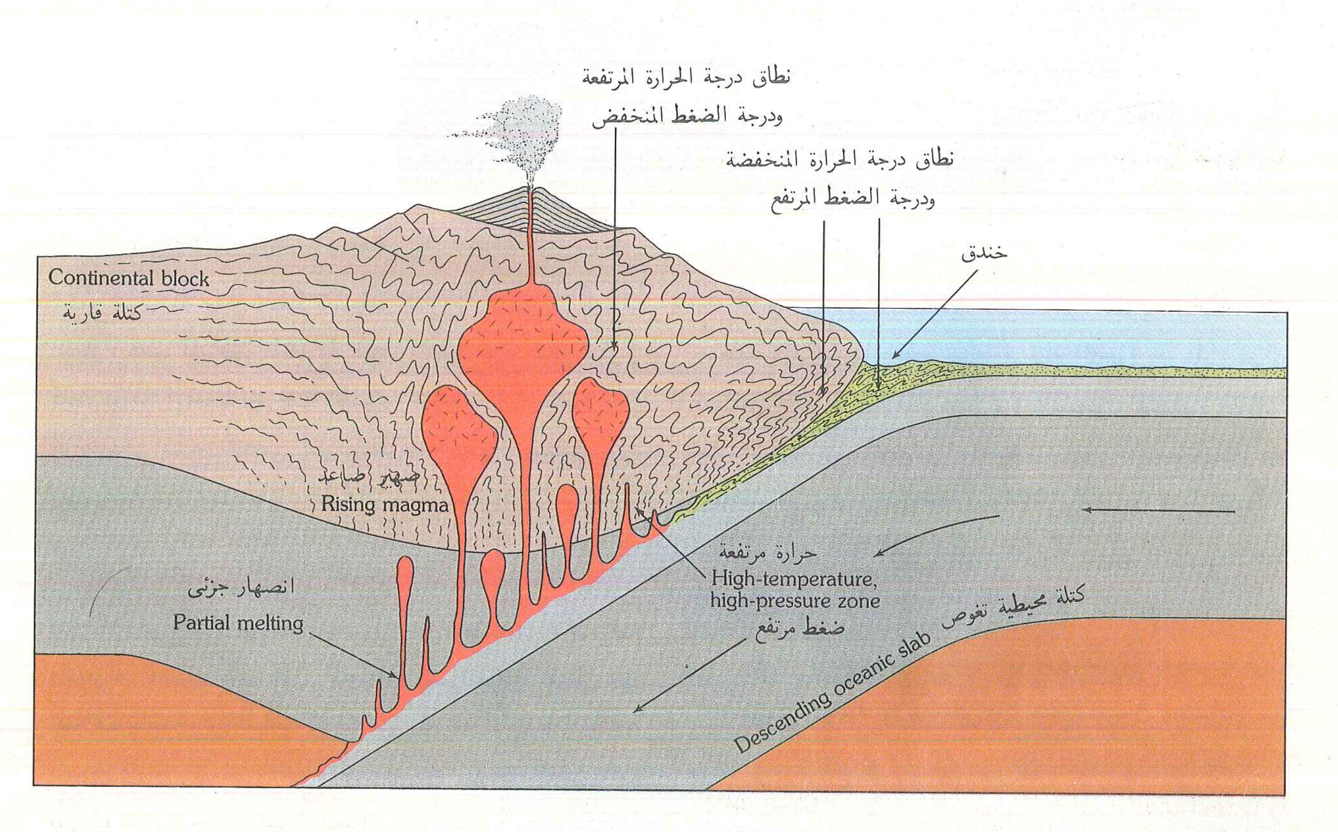
ويبين الفحص الدقيق لشكل (7 ـ 15) بأنه يوجد أكثر من نوع من بيئات التحول على امتداد الأطراف المتقاربة. فقرب الخنادق المحيطية يتم غوص كتل من الغلاف الصخرى البارد الى أعماق سحيقة. وبهبوط الغلاف الصخرى والرواسب المصاحبة له، يزداد الضغط بمعدل أكبر من زيادة الحرارة. ويحدث ذلك لأن الصخور تعتبر رديئة التوصيل للحرارة. ولهذا فان تسخين الكتل السميكة يتقدم ببطء. فالصخور التى تتكون فى هذه البيئة ذات الضغط الكبير بالنسبة للحرارة تسمى بصخور الشيست الأزرق والتى تستمد اسمها من معدن الغلوكوفين الأمفيبولى ذى اللون الأزرق الذى ينشأ تحت هذه الظروف.

وفى المناطق السطحية الواقعة فى اتجاه اليابسة من منطقة الخنادق المحيطية تسود فى بيئة التحول درجات حرارة مرتفعة بالنسبة للضغط. وهنا تؤثر الصخور المنصهرة القادمة من أسفل على الصخور المحيطة بها فى بيئة خفيفة الى معتدلة الضغط. ويمثل هذا النوع من البيئات جبال صحراء نيفادا الامريكية التى تحتوى على صخور نارية مقتحمة وصخور متحولة مصاحبة لها.

ومن الواضح أن معظم المواد المتأثرة الموجودة قرب الخنادق المحيطية تتألف من حزامين طوليين متميزين من الصخور المتحولة. وفى أقرب موقع للخندق نجد أن هناك نظاما ذا ضغط عال وحرارة منخفضة. أما فى اتجاه اليابسة فى منطقة اقتحام الكتل النارية الجوفية، فان عمليات التحوّل تسودها بيئات ذات حرارة مرتفعة وضغط منخفض الى معتدل.

وبالاضافة الى الأحزمة الطولية من الصخور المتحولة التى توجد فى محاور معظم الأحزمة الجبلية، توجد امتدادات

للصخور المتحوّلة فى الأجزاء الداخلية المستقرة من القارات. وتسمى هذه الامتدادات المنبسطة من الصخور المتحوّلة ومن الكتل الجوفية للصخور النارية بالدروع. وأحد هذه التركيبات وهو الدرع الكندى له تضاريس منبسطة ويكوّن الصخور السطحية فى معظم مناطق وسط كندا ممتدا من خليج هادسون حتى شمال ولاية مينيسوتا. ويدل التأريخ الاشعاعى لصخور الدرع الكندى على أنها من بين أقدم الصخور عمرا فوق سطح الأرض. وبما أن هذه الدروع قديمة وأن تركيبها الصخرى يشبه التركيب الصخرى للبب الجبال الحالية، فانه يعتقد بأن الدروع تمثل بقايا لعمليات بناء الجبال التى تمت فى أزمنة أكثر قدما. فاذا صح هذا التحليل، فهو يدل على أن الأرض كانت دائمة الحركة خلال فترات سحيقة من تاريخها. وباستمرار دراسة مناطق التحوّل فى اطار نموذج تحرك الألواح، سوف تتضح للجيولوجيين معلومات جديدة عن مشكلة نشأة القارات. وسوف نتناول هذا الموضوع بشىء من التفصيل فى الفصل الثامن عشر.



شكل 7 ـ 15

بيئات التحول حسب نموذج حركية الألواح.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ ما هو التحوّل؟ وما هى عوامل التحول؟

2 ـ ما هو التورق؟ ميّز بين الانفصام الصخرى وتورق الشيست؟

3 ـ عدّد بعض التغيرّات التى قد تحدث فى الصخور نتيجة لتعرضها لعمليات التحول.

4 ـ الأردواز والفيلايّت متشابهان. فكيف تميّز بينهما؟

5 ـ تصف كل من الجمل الآتية واحدا أو أكثر من خصائص صخر متحوّل معين. فى كل جملة أذكر اسم الصخر المتحول الموصوف: ـ

أ ـ صخر غنى بمعدن الكالسيت وعديم التورق.

ب ـ صخر متورق وتغلب عليه معادن حبيبية.

جـ ـ صخر يمثل درجة تحول تقع بين الأردواز والشيست.

د ـ صخر دقيق الحبيبات متورق، له انفصام صخرى جيد.

هـ ـ صخر متورق يحتوى على أكثر من 50% من معادن صفائحية.

و ـ صخر يحتوى غالبا على أحزمة متعاقبة من سليكات فاتحة وسليكات غامقة.

ز ـ صخر صلب عديم التورق ناتج عن تحول التماس.

6 ـ فرّق بين تحوّل التماس والتحوّل الشامل. أيهما يكون مسئولا عن تكوّن أكبر كمية من الصخور المتحولة؟

7 ـ ما هى الخاصية التى يمكن بواسطتها تمييز الشيست والنايس بسهولة عن الكوارتزيت والرخام؟

8 ـ صف باختصار الفرق فى النسيج والتركيب المعدنى بين الأردواز والشيست المايكى والنايس. أى من هذه الصخور يمثل أشد درجات التحوّل؟

9 ـ هل يعد المغماتيت من بين الصخور شديدة التحوّل أم خفيفة التحوّل؟

10 ـ أى نوع من أطراف ألواح القشرة الأرضية يصاحبه التحوّل الشامل؟

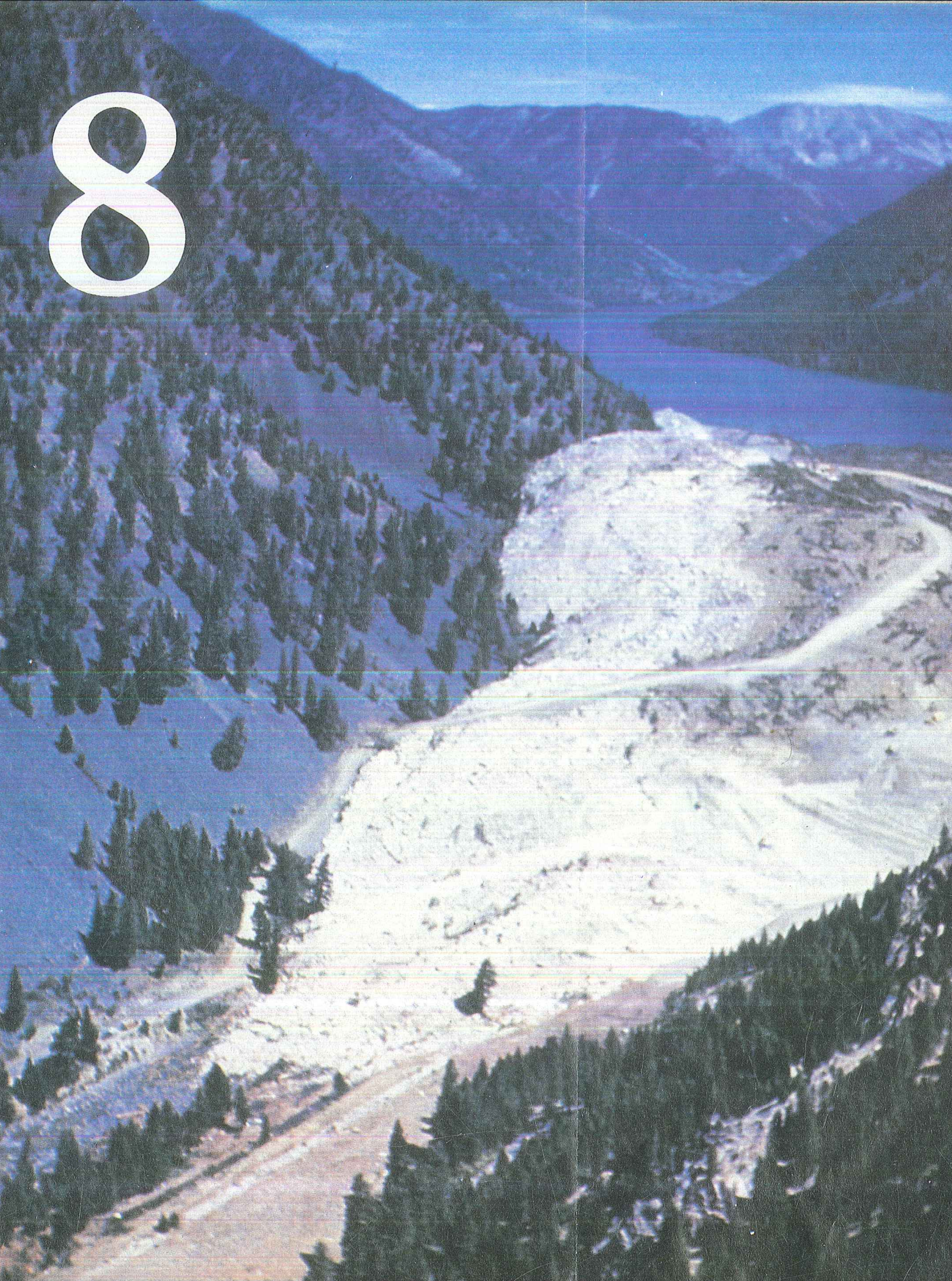
الكلمات الدالة :

أذينة	aureole	المعدن الدال	index mineral
الانفصام الصخرى	rock cleavage	القوة القاصة	shear
التحول الشامل	regional metamorphism	تحول التماس	contact metamorphism
الانقسام	schistosity	تورّق	foliation
الضغط	stress	درع	shield
		محاليل المياه الحارة	hydrothermal solution
		مغماتيت	migmatite
		عديمة التورق	nonfoliated

8



تبدد الكتل


8

التحكم فى تبدد الكتل

تصنيف وسائل تبدد الكتل

- نوعية المادة
- نوعية الحركة
- معدل الحركة

الهبوط

الانزلاق الصخرى

التدفق الطينى

التدفق الترابى

الزحف

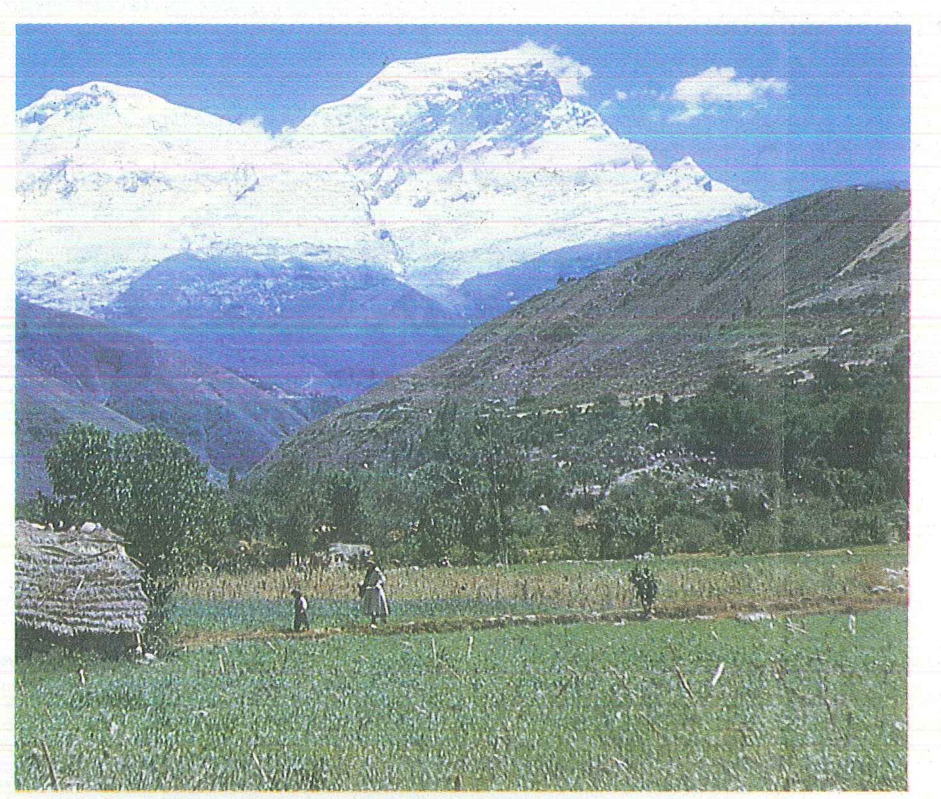
الجمد السرمدى والتموج الانفرادى

بين الحين والآخر تنقل الينا وسائل الاعلام بعض التفاصيل عن الانهيارات وآثارها المؤلمة. ومثال ذلك ما حدث فى يوم 31 مايو من سنة 1970 حين اندفع تيهور صخرى ضخم ليدفن تحته ما يزيد على 20,000 نسمة فى بيونجى ورانراهيريكا ببيرو (شكل 8 ـ 1). فقد بدأ التيهور فجأة وبدون انذار على بعد 14 كيلومترا من بيونجى بالقرب من نيفادوس هواسكاران، التى يبلغ ارتفاعها حوالى 6700 مترا فوق سطح البحر، وهى أعلى قمة بجبال الانديز بيرو. فقد اندفعت كتلة ضخمة من الصخور والجليد بعد هزة أرضية كان مركزها داخل البحر من الجانب الشمالى الشديد الانحدار للجبل. وبعد اندفاعها الى مسافة تقرب من الكيلومتر تفتتت الصخور، وذاب الجليد بفعل الهواء المحجوز بالداخل، والذى زاد أيضا من سرعتها. وقد عملت الكتلة الاصلية على خلع ملايين الاطنان الاضافية من الفتات الصخرى، الذى اندفع مزمجرا على سفح الجبل. وقد نتج عن موجة الهزة ما يشبه صوت الرعد، وتجريد منحدرات بكاملها من غطائها النباتى. وبالرغم من اتباع التيهور مسار أحد الوديان الذى سبق نحته فى الصخور هناك الا أن جزءاً من مكوناته قد قفزت فوق تل يبلغ ارتفاعه بين 200 و 300 متر، كان يحمى بيونجى وذلك ليدفن المدينة بكاملها. وبعد غمر الكتلة لمدينة رانراهيريكا هى الأخرى وصل التيهور قاع الوادى مرتفعا عشرات الامتار على الضفة المقابلة.

انزلاق مضيق ماديسون الذى سببه الزلزال.

ولم تكن هذه الكارثة الأولى والأخيرة من هذا النوع فى المنطقة. فقد حدث تيهور اصغر حجما، قبل ثمانى سنوات وصلت ضحاياه الى حوالى 3500 نسمة. وكما هو حال الكثير من الكوارث الجيولوجية فان مسببات التيهور الصخرى بالبيرو كانت طبيعية، أى هزة أرضية. غير أن بعض الكوارث الناجمة عن تبدد الكتل قد يتسبب الانسان فى حدوثها. ففى سنة 1960 مثلا شيّد سد يقارب ارتفاعه 265 مترا فوق مضيق فايونت بجبال الألب الايطالية، وبعد ثلاث سنوات، وفى ليلة 9 اكتوبر 1963 م حدثت كارثة كان السد سببها الرئيسى. فقد كانت طبقات حوض الوادى المكوّنة من الحجر الجيرى المتشقق والحاوى لفجوات الاذابة وبعض الطبقات الطينية ذات ميل شديد تجاه البحيرة وراء السد. وعند تشبع الطبقات السفلى وانتفاخ محتوياتها من الطين وزيادة لدونته، نقصت قوة الاحتكاك الداخلى التى كانت تعمل على تثبيت الصخور فى مكانها. فقد اشارت القياسات الى هذه المشكلة مبينة أن ذلك الجزء من الجبل قد بدأ فى الحركة الى اسفل بمعدل 1 سنتيمترا فى الاسبوع. وفى سبتمبر 1963 زاد هذا المعدل الى 1 سنتيمترا فى اليوم ثم 10 الى 20 سنتيمترا فى اليوم واخيرا 80 سنتيمترا فى اليوم.

وبعد ذلك انطلق جانب الجبل ليدفع فى لحظات بمقدار 240 مليون متر مكعب من الصخور، مغطية مسافة كيلومترين من المضيق اسفله الى ارتفاع بلغ 150 مترا فوق مستوى بحيرة السد (شكل 8 ـ 2). وبملء خزان السد اندفعت مياهه الى الخارج فى موجة يزيد ارتفاعها على 90 مترا. وقد بقيت هذه الموجة اسفل السد بحوالى 1.5 كيلومترا على ارتفاع 70 مترا مدمرة كل ما فى طريقها. وبالرغم من





شكل 8 ـ 1
وادى بيرو تم تدميره بتيهور صخرى تحرك نتيجة لزلزال داخل المحيط فى مايو 1970 م. (أ) ـ قبل. (ب) ـ بعد التيهور.

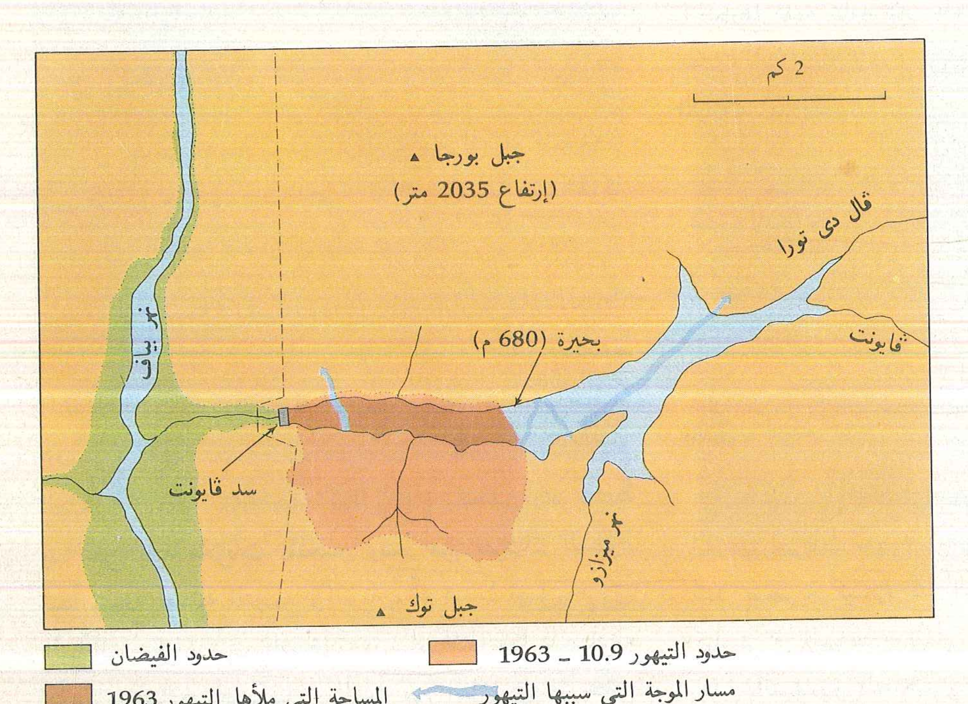
ان الحادثة لم تستمر اكثر من 7 دقائق وان جسم السد بقى سليما، الا انها تسببت فى القضاء على 2600 نسمة. وتعرف هذه الحادثة بأنها افظع حوادث السدود فى التاريخ. وبالرغم من ان سببها المباشر كان ناتجا عن تدخل الانسان فى وضع نهر فيونت الا انها كانت يمكن أن تحدث طبيعيا ولكن بأضرار أقل. ولحسن الحظ فان مثل هذه الكوارث نادرة الحصول وقلما تؤثر مباشرة فى اعداد كبيرة من البشر.

التحكم فى تبدد الكتل

الانهيالات أمثلة مذهلة لظاهرة جيولوجية طبيعية تسمى تبدد الكتل. وهى تشير الى حركة الصخور والتربة اسفل منحدر تحت تأثير الجاذبية. فالتعرية تعمل على تفتيت الصخور والهشيم ليندفع نتاجها اسفل المنحدرات تحت تأثير الجاذبية، ومن ثم يأخذ طريقه الى المحيطات. وبهذه الطريقة يتم بالتدريج تشكلُ سمات الأرض الطبيعية.

وتعتبر الجاذبية القوة الفعالة المتحكمة فى عملية تبدد الكتل. غير أنه هناك عوامل أخرى تلعب دورا مهما فى حركة مخلفات التعرية اسفل المنحدرات. والماء هو أحد هذه العوامل. فعند ملء الفراغات المسامية بالماء يتعطل التماسك بين جزئيات المادة، مما يسمح لها بالانزلاق قبالة بعضها البعض بسهولة أكثر. فمثلا عندما يكون الرمل قليل الرطوبة، يتماسك بعضه ببعض. واذا ما اضيفت اليه كمية أكبر من الماء فانه ينتشر فى جميع الاتجاهات. وبناء عليه فان تشبع المادة بالماء يعمل على انقاص مقاومتها الداخلية مما يدفعها الى الحركة بسهولة تحت تأثير الجاذبية. كما أن زيادة الماء بالنسبة الى الطين يزيد فى وزنها، ومن ثم انزلاقها. وهو مثل آخر فى كون الماء عامل انزلاق مهم. وزيادة الوزن والانحدار الشديد سببان مهمان فى حركة الكتل.

وتحافظ الحبيبات غير المتماسكة على وضعها فوق المنحدرات فيما يسمى بزاوية السكون. وهى أقصى زاوية ميل للمنحدر تضمن بقاء المواد فوقه دون تأثر، وتتراوح زاوية السكون بين 25 و 40 درجة، وذلك بناء على حجم وشكل الجزئيات. فكلما زاد حجم حبيبات الفتات الصخرى وقل تشذيبها كلما زادت زاوية سكونه. وكلما زادت قيمة زاوية



شكل 8 ـ 2
ارتفاع المياه فى بحيرة السد بعد انطلاق جانب الجبل.

الميل كان رد فعل المواد بالتحرك اسفل المنحدر لتأخذ وضعا جديدا. وهناك فى الطبيعة أمثلة كثيرة عن ذلك. فالمجرى المائى الذى يقوم بجرف جوانبه، والأمواج المرتطمة بقاعدة الاجرف البحرية ما هما الا مثالين مألوفين لنا. كما ان الانسان قد يكوّن منحدرات شديدة الميل بنشاطه غالبا ما تكون مواقع مثالية لحركة تبدد الكتل.

تصنيف وسائل تبدد الكتل

يطلق الجيولوجيون مصطلح تبدد الكتل على عملية معقدة من الحركة. ويتم تصنيفها بناء على نوع المواد ذات العلاقة ونوعية الحركة وسرعتها.

نوعية المواد

يعتمد تقسيم تبدد الكتل باستخدام نوعية المواد على ما اذا كانت المكونات متماسكة أو غير متماسكة. فاذا كانت غالبيتها من التربة والهشيم، فان الكلمات الحطام والوحل والتراب قد تستعمل لوصفها. اما اذا كانت الكتلة جزءا من الطبقات الصخرية المتماسكة فتستعمل كلمة الصخر فى وصف مكوناتها.

نوعية الحركة

الى جانب أهمية نوعية المواد المكونة للكتلة المتبددة، تعتبر طريقة حركتها ذات أهمية كذلك. وعموما فان الحركة تقسم الى: السقوط والانزلاق والتدفق.

فعندما تشمل الحركة وقوع قطع يشار اليها بالسقوط، وذلك بغض النظر عن حجم هذه القطع. ويميز السقوط المنحدرات الشديدة الميل، والتى يصعب على الحطام الصخرى الغير متماسك ان يبقى على سطحها. وقد يقع الصخر فى هذه الحالة مباشرة الى قاع المنحدر، وقد يسقط وثبا على بقية مكونات المنحدر. وكثير من حركات السقوط تبدأ نتيجة لعملية التجمد والذوبان، أو عندما تعمل عروق النباتات على تفتيت الصخور وتسليم نتاجها للجاذبية لتأخذ دورها فى تحريكها. وبالرغم من اننا نرى فى بعض الأماكن اشارات للمرور تنبهنا الى تدحرج الصخور من فوق المنحدرات المحاذية للطرق العامة، الا ان القليل منا قد شاهد مثل هذه الصخور اثناء حركتها. وبالرغم من ذلك فانها كما يوضح الشكل (8 ـ 3) غير نادرة الحدوث، بل ان كتل الفلذ الصخرية، التى نشاهدها اسفل المنحدرات، تتجمع بهذه الطريقة. وقد تعمل حركة السقوط هذه الى بدء انواع اخرى من تبدد الكتل. فكما تذكر أن كارثة يونجى الوارد ذكرها اعلاه قد بدأت بسقوط كتلة من على منحدر يكاد يكون عموديا من على قمة جبل نيفادوس هواسكاران.

وتوصف كثير من حركات تبدد الكتل **بالانزلاق**. وهى حركة تبقى خلالها مكونات الكتلة المتبددة ملاصقة للسطح اثناء حركتها. وقد يكون هذا السطح وجها فاصلا لصدع أو كسر أو مستوىً طبقى موازٍ للمنحدر تقريبا. وعندما يكون سطح الحركة منحنى لانشطار ارضى، تسمى حركة الانزلاق بالهبوط. والجدير بالذكر ان العديد من الناس بما فى ذلك الجيولوجيين يستعملون هذا المصطلح الا انه ليس لكلمة الانزلاق أى تعريف محدد فى علم الجيولوجيا. وعليه يجب اعتبارها كلمة عامة غير علمية تستعمل فى وصف كل أنواع تبدد الكتل المعروفة بما فى ذلك تلك التى لا دور لحركة الانزلاق فى تكوّنها.

والنوع الثالث لحركة تبدد الكتل يسمى **التدفق**. وهو يحدث عند حركة المواد اسفل المنحدرات كسائل لزج. وأغلب هذه التدفقات تكون مشبعة بالماء وتتحرك على هيئة ألسنة وفصوص. والشكل (8 ـ 4) يوضح المظهر المميز للتدفق.

معدل الحركة

تشمل الاحداث التى سبق ذكرها فى مقدمة هذا الفصل حركات سريعة. وهى سواء كانت حطاما صخريا أو كتلا صخرية كبيرة قد تحركت بسرعة تزيد على 200 كيلومتر فى الساعة. ويسمى هذا النوع من الحركة السريعة جدا **بالتيهور الصخرى**. ويعتقد بعض الباحثين بان

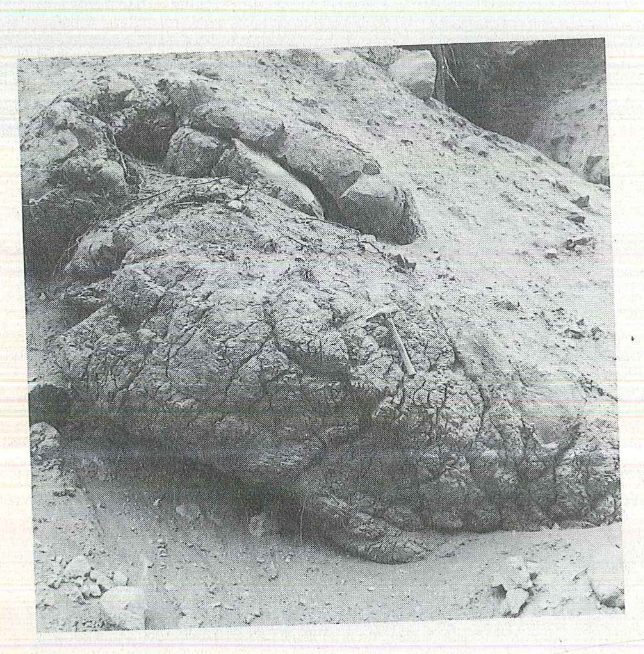
التيهور الصخرى المماثل لما هو مبين بالشكل (8 ـ 5) قد يتحرك سابحا فى الهواء عند حركته اسفل المنحدرات، أى أن الهواء المحجوز والمضغوط بين كتلة الحطام الصخرى والمنحدر قد جعل هذه الكتلة قادرة على الحركة فوق السطح على هيئة ملاءة مرنة طافية.

ولا تتحرك كل الكتل مثل التيهور، بل الحقيقة ان معظمها بطىء جدا. وأحد أنواع هذه الحركة البطيئة، والذى سيتم شرحه فيما بعد، يسمى بالزحف لا تزيد سرعته على بضع مليمترات أو على سنتيمتر واحد فى السنة. وعليه يمكنك أن ترى أن بعض حركات تبدد الكتل تحدث فجأة، والبعض الآخر يحدث بالتدريج. وبالرغم من أن حركة الكتل المتبددة توصف بأنها اما سريعة أو بطيئة الا انه يصعب رسم خط فاصل بينهما، وذلك لاتساع مدى معدل الحركة بين طرفيها المتباعدين. هذا وقد تختلف سرعة حركة نوع معين من الكتل المتبددة من وقت الى آخر.

الهبوط

يقصد بالهبوط انزلاق كتلة صخرية أو مادة غير متماسكة كوحدة واحدة على سطح منحنى (شكل 8 ـ 6). والهبوط نوع من أنواع تبدد الكتل واسع الانتشار وخاصة فى المناطق ذات المكونات الطينية. وهو لا يتميز بحركة سريعة جدا كما انه لا يبتعد كثيرا عن منشأه. ويتميز سطح الانشطار الارضى تحت الهبوط بشكل يشبه الملعقة، أى منحنى مقعر. ويتكون جرف هلالى عند أعلى الهبوط، كما انه تحدث حركة دائرية الى الوراء للمواد المكونة له. وقد يتكون الهبوط من وحدة واحدة أو يكون مركبا من عدة قوالب (شكل 8 ـ 7). وعند تسرب الماء خلال هذه الشقوق يحدث عدم استقرار فى وضع الكتلة، وربما فى حركتها مرة اخرى.

ويحدث الهبوط عندما يكون المنحدر شديد الميل، حيث تكون مواد اعلى المنحدر متكأة على المواد بقاعدته. وبازالة



شكل 8 ـ 4

عند حركة الفتات الصخرى بواسطة التدفق غالبا ما يكون له مظهر الفصُوص.



شكل 8 ـ 3

تجمع الصخور بعد سقوطها أسفل المنحدرات.

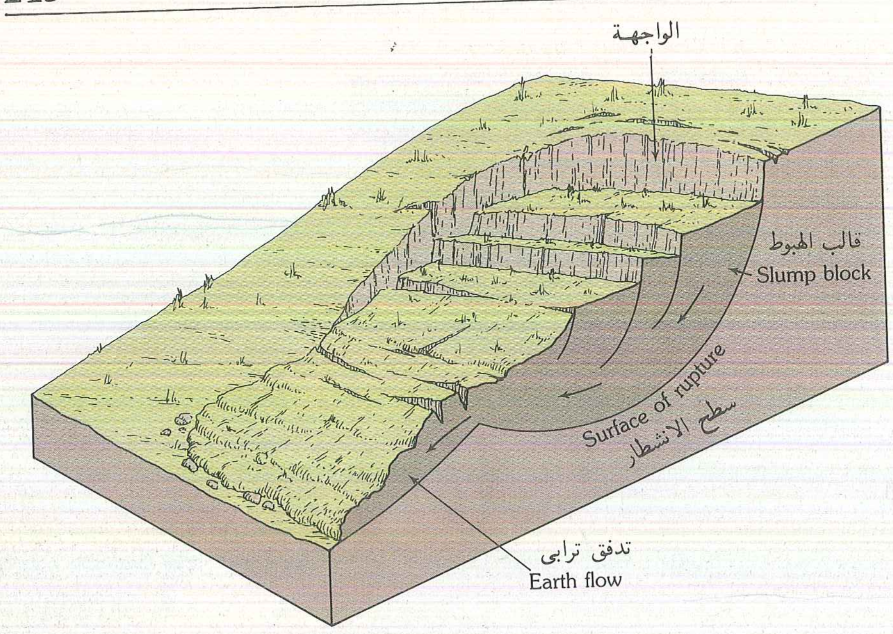


شكل 8 ـ 5
تراكم الفتات فوق مجلد شيرمان بواسطة تيهور صخرى. بدأ التيهور بسبب زلزال شديد فى المريخ من سنة 1964 م.

المواد عند القاعدة تصبح المواد فى أعلى المنحدر غير مستقرة وبالتالى تتحرك تحت تأثير الجاذبية. وكما يوضح الشكل (8 ـ 8) فإن الامواج قد عملت على قطع قاعدة الجرف وبالتالى الى هبوطه. وقد يحدث ايضا الهبوط عند زيادة الحمولة عند اعلى المنحدر محدثا ضغطا داخليا على المواد عند القاعدة. ويحدث مثل هذا الهبوط عندما توجد طبقات ضعيفة التماسك غنية بمكوناتها الطينية اسفل طبقات أكثر صلابة ومقاومة مثل الصخور الرملية. فالماء المتخلل للطبقات الرملية يقلل من مقاومة الطبقات السفلى من الطين، مما يدفع بحمولتها الى اسفل المنحدر ناجما عن ذلك انهيار مكوناته.

الانزلاق الصخرى

يحدث الانزلاق الصخرى عندما تنكسر قوالب من الطبقات الصخرية وتتحرك منزلقة اسفل منحدر. وهذا النوع من اسرع تبدد الكتل حركة وأكثرها تدميرا. وعادة ما تحدث الانزلاقات الصخرية عندما تكون الطبقات مائلة أو عندما تكون الفواصل والتشققات موازية لسطح المنحدر. ويتحرك الانزلاق الصخرى عند قطع قاعدة المنحدر، أو عندما تزيد مياه الأمطار أو المياه الناتجة عن ذوبان الجليد من لزوجة الطبقات السفلى، الى درجة يقل فيها الاحتكاك، ويصعب



شكل 8 ـ 6
يحدث الهبوط بحركة كتلة أسفل منحدر على سطح انشطار منحنى.

شكل 8 ـ 7
يتكون الهبوط عادة من عدة قوالب كما يبين هذا الهبوط بمقاطعة ماديسون بولاية مونتانا الأمريكية.



شكل 8 ـ 8
هبوط بونيت نيرن بكاليفورنيا غالبا ما يبدأ الهبوط عندما يصبح المنحدر شديد الميل نتيجة لعوامل التعرية مثل الأمواج.

على الكتلة اعلاه البقاء فى مكانها. وعليه فان الانزلاقات الصخرية تكثر خلال فصول نزول الامطار وذوبان الجليد. كما تشارك الزلازل فى دفع حركة الانزلاقات الصخرية وكذلك باقى انواع تبدد الكتل. ففى سنة 1800 تسببت الزلازل بمنطقة نيومدريد بولاية ميسورى الامريكية فى انزلاقات على مساحة 13.000 كيلومتر مربع من وادى نهر المسيسبى. كما أن زلازل منتزه البيلوستون فى 16 أغسطس من سنة 1959 مثال آخر تسبب فى انزلاق ضخم بمضيق نهر ماديسون بولاية مونتانا الامريكية (شكل 8 ـ 9). ففى لحظات انزلق ما يقدر بحوالى 27 مليون متر مكعب من الصخور والتربة والأشجار داخل المضيق مما ادى الى سد مسار النهر وردم منطقة تخييم وطريق رئيسية.

ويجرى نهر جروس فنتر غربا عند الشمال الغربى لولاية ويومنج الامريكية وهو أحد روافد نهر السنيك. وقد وقع انزلاق بوادى هذا النهر فى 23 يونيو من سنة 1925 الى الشرق من مدينة صغيرة، تسمى كيلى، وذلك من الصخور الرملية والطينية والتربة واشجار الصنوبر، فى دقائق مكونا سدا يقدر حجمه بحوالى 38 مليون متر مكعب، وبارتفاع بلغ 70 مترا (شكل 8 ـ 10). وقد انسد مجرى النهر كليا مكونا بحيرة اقتلعت مياهها بيتا كان على ارتفاع 18 مترا فوق مستوى النهر وذلك بعد 18 ساعة من الانزلاق. وفى سنة 1927 فاضت مياه هذه البحيرة وغمرت المنطقة الواقعة تحتها.

لماذا حصل انهيال جروس فنتر؟ شكل (8 ـ 11) يمثل رسما تخطيطيا لقطاع يوضح جيولوجية المنطقة. لاحظ النقاط التالية: (1) ميل الطبقات فى هذه المنطقة 15 الى 16 درجة. (2) الطبقة الطينية الرقيقة تحت طبقة الصخور الرملية. (3) عملت مياه النهر على انقطاع جزء كبير من الطبقة الرملية. أثناء ربيع سنة 1925 تسربت مياه الأمطار الغزيرة والمياه الناتجة من ذوبان الثلوج خلال طبقة الصخور الرملية، مشبعة الطبقة الطينية تحتها. وحيث أن مياه النهر قد اقتطعت جزءا من الصخور الرملية، بقيت هذه الطبقة من غير سند بأسفل المنحدر، ولم تستطع الصمود فى مكانها فوق الطبقة الطينية المبللة الرخوة، وعليه شدت الجاذبية الكتلة الى اسفل حيث أن الظروف كانت مهيأة لانهيال لا مفر منه.

التدفق الطينى

التدفق الطينى نوع من أنواع تبدد الكتل، يشمل اندفاع حطام صخرى به كمية كبيرة من الماء. ويميز هذا



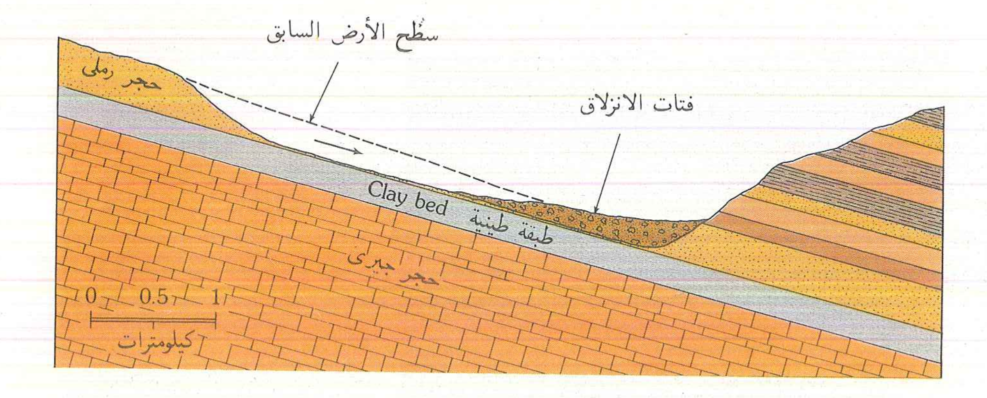
شكل 8 ـ 9
تراكم من الفتات الصخرى يقدر بحوالى 27 مليون متر مكعب يسد نهر ماديسون بمونتانا حيث بدأ بواسطة بركان هانيبال فى 17 (أغسطس) 1959.



شكل 8 ـ 10
علامات تركها إنزلاق جروس فنتر على جبل شيب.

التبدد مجارى الأودية الشبه جافة (شكل 8 ـ 12). وعند هطول أمطار غزيرة بهذه المناطق تندفع الى داخل المجرى كميات كبيرة من رسوبيات الجانبين اللذين عادة ما يفتقران الى غطاء نباتى. وينتج عن ذلك تدفق طينى على شكل لسان من التربة والصخور والماء. وعادة ما تكون مكونات هذا التدفق جيدة الخلط ذات قوام قد يكون رقيقا او غليظا. ولكثافته العالية فان التدفق الطينى يكون قادرا على نقل أو دفع جلاميد الصخر الضخمة والاشجار أو حتى المنازل بكل سهولة. وينتشر التدفق الطينى عند وصوله الى نهاية المضيق ليغطى المنطقة المنبسطة أمامه بخليط من مكوناته المبللة على شكل مروحة. وقد استصلحت الكثير من هذه المراوح الرسوبية ذات المناظر الجميلة، وتم تعميرها دون العلم بخطورة ذلك مما أدى الى الكثير من الكوارث.

وتوجد مثل هذه الرسوبيات فى المناطق البركانية حيث تغطى كميات كبيرة من الرماد البركانى جوانب البركان الشديدة الانحدار. وفى أعقاب هطول الأمطار أو ذوبان



شكل 8 ـ 11

قطاع خلال انزلاق جروس فنتر. حدث الانزلاق عند قطع أسفل طبقات الصخور الرملية وعدم استطاعتها البقاء فى مكانها فوق طبقة الطين المشبعة.





شكل 8 ـ 12

(أ) ـ منظر لتدفق سلمجليون الطينى من منشأه الى بحيرة سان كرستوبل، مسافة عمودية تبلغ حوالى 780 متراً منذ حدوثه ما قبل التاريخ لا نعلم مباشرة معدل حركته.

(ب) ـ بيت أصابته أضرار تدفق طينى على نهر توتل الى شمال غربى جبل سانت هيلين بشمال غربى أمريكا. جزء من البيت تم اجتثاثه ودفعه على أحد الأشجار.

الجليد تندفع هذه المكونات على هيئة تدفق طينى. ومثال ذلك ما حدث بجبل سانت هيلينز شمال غربى أمريكا وذلك سنة 1980 حيث أدت الحرارة الداخلية المنبعثة من البركان الى اذابة كميات كبيرة من الثلج، مكونا تدفقا طينيا غنيا بالرماد البركانى لينتشر مغطيا مساحات واسعة.

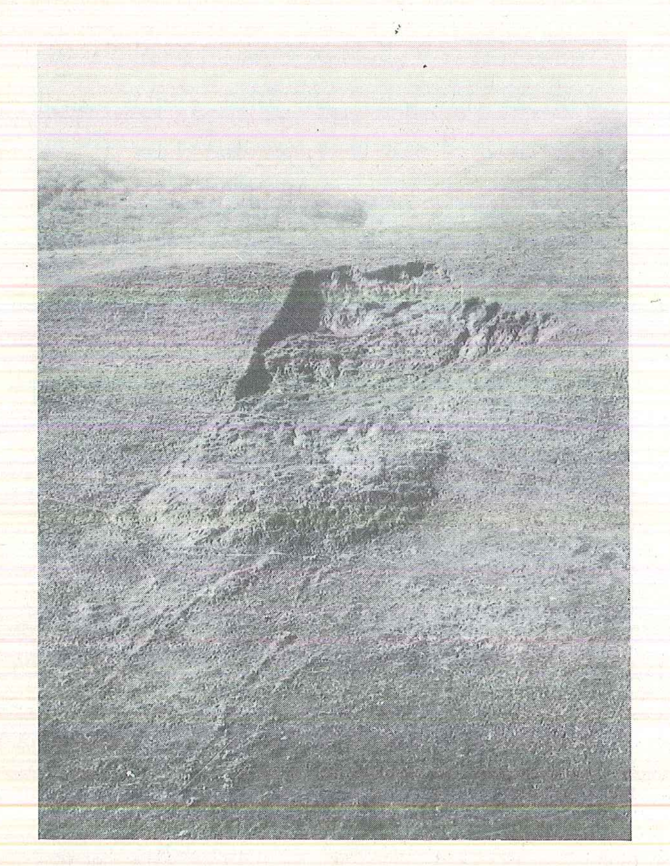
التدفق الترابى

خلافا للتدفق الطينى الذى عادة ما يكون مقصورا على مجارى المياه فى المناطق الشبه جافة فان التدفق الترابى غالبا ما يحدث فوق سفوح المنحدرات فى المناطق الممطرة. وعند تشبع الهشيم الغنى بالطين فوق سفوح الهضاب، قد ينتقل مندفعا مسافات قصيرة الى اسفل تاركا علامات مميزة على السطح (شكل 8 ـ 13). وقد تتفاوت سرعة التدفق الترابى من بضعة أمتار فى الساعة الى عدة أمتار فى الدقيقة متوقفة فى ذلك على شدة الانحدار وتجانس المواد.

وحيث أن التدفق الترابى لَزِجٌ فان حركته تكون اقل من التدفق الطينى الاكثر سيولة. والى جانب حدوث التدفق الترابى حول المرتفعات المعزولة، فهو كثيرا ما يتكون برفقة هبوط كبير وذلك على شكل لسان عند قاعدة الكتلة الهابطة (شكل 8 ـ 6).

الزحف

حيث أن الانزلاقات الصخرية والتيهورات أكثر أنواع تبدد الكتل اثارة للمشاهد، الى جانب انها تتسبب فى فقدان الآلاف من البشر، فهى تستحق الدراسة المفصلة، وذلك لنتمكن من توقع حدوثها بدقة اكثر، والتنبيه عنها، مما يساعد فى انقاذ أرواح كثيرة. ولكن ضخامة حجمها وطبيعة مناظرها، تقدم لنا صورة خاطئة عن قدر اهميتها كوسيلة من وسائل تبدد الكتل. وبالتأكيد فان الحركات الفجائية تعد أقل اهمية من الزحف الذى هو ابطأ حركة وأوضح نشاطا. وفى الوقت الذى تميز فيه الحركات السريعة تبدد الكتل على جوانب التلال والجبال الشديدة الانحدار، فان حركة الزحف



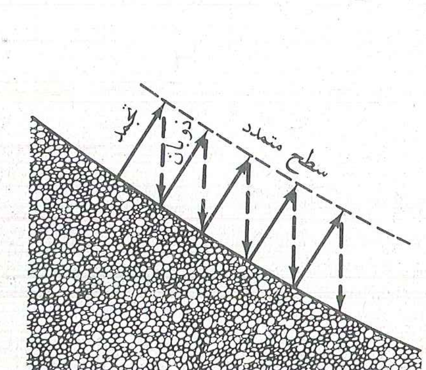
شكل 8 ـ 13

تدفق ترابى.

مثلا، يمكن أن تحدث على السطوح القليلة الانحدار، وعليه فانها اكثر انتشارا.

ويشمل **الزحف** وهو أحد انواع تبدد الكتل حركة التربة والهشيم اسفل المنحدرات. واحد الاسباب الرئيسية للزحف تبادل ظاهرتى تمدد وانكماش مكونات السطح، الناتجة عن ظاهرة التجمد والذوبان أو البلل والجفاف. وكما يوضح الشكل (8 ـ 14) فان التجمد أو البلل يعمل على رفع التربة فى اتجاه عمودى على المنحدر (الخطوط المتصلة). ومن ثم فان الجفاف أو ذوبان الثلج يسمح للجزئيات بالهبوط الى مستويات اقل ارتفاعا (الخطوط غير المتصلة). وعليه فان كل دورة من التجمد والذوبان، أو البلل والجفاف، تعمل على

دفع المكونات الى اسفل قليلا (شكل 8 ـ 15). وقد يحدث الزحف كذلك فى المناطق التى تتشبع بالمياه عقب ذوبان ثلجى أو هطول أمطار غزيرة، مما يفقد التربة قوة تماسكها الداخلية، ويسمح للجاذبية بشدها اسفل المنحدرات. وبالرغم من أن الحركة هنا جداً بطيئة، غير أن نتائجها يمكن أن تشاهد ويمكن التعرف عليها. فغالبا ما يسبب الزحف فى ميل اعمدة الاسلاك الشائكة والهاتف وانثناء جذوع الأشجار (شل 8 ـ 16).



شكل 8 ـ 14

مسار أحد الجزيئات أثناء الزحف. تحدث الحركة باعادة التحدر والانكماش لمكونات السطح.

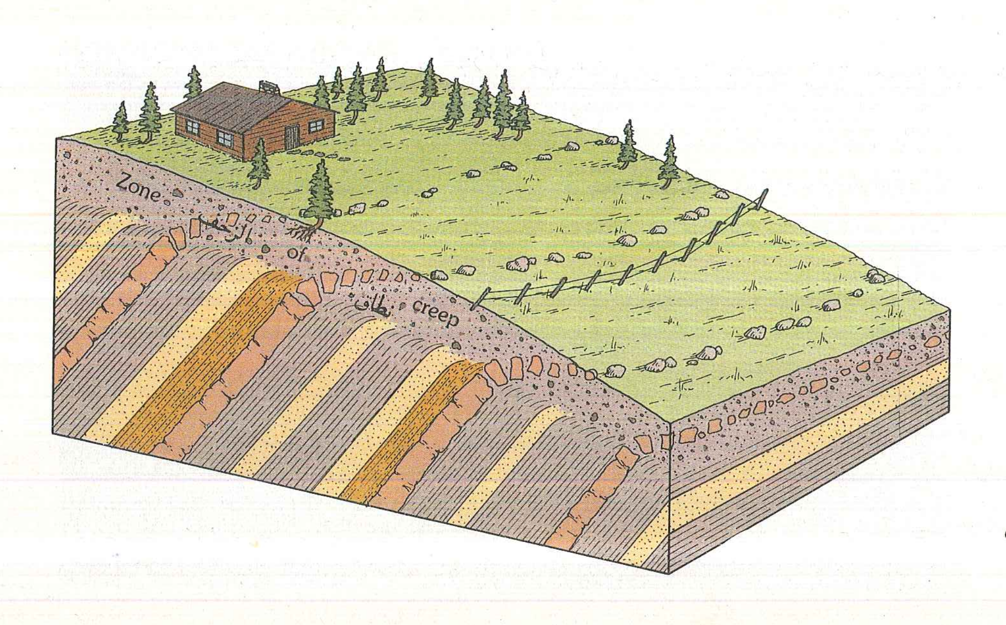
الجمد السرمدى والتموج الانفرادى

عندما يكون معدل درجة حرارة الهواء الجوى منخفضا باستمرار مما يبقى درجة حرارة السطح تحت الصفر، فان العمق الذى يصل اليه التجمد فى الشتاء يزيد على عمق الذوبان خلال الصيف. وينتج عن ذلك طبقة دائمة التجمد



شكل 8 ـ 15

تقوم الأجزاء العليا من طبقات الطين العمودية والمتأثرة بعوامل التجوية بالزحف أسفل المنحدر.



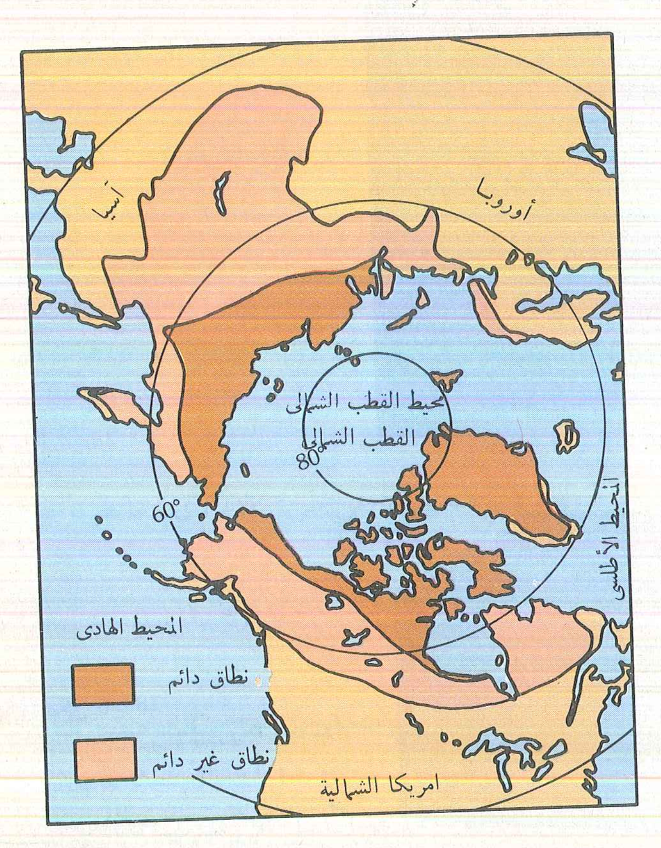
شكل 8 ـ 16

بالرغم من بطء حركة الزحف الا أن نتائجه غالبا ما تكون واضحة.

تسمى طبقة الجمد السرمدى. وتوجد مثل هذه الطبقة تحت سطح تبلغ مساحته الاجمالية حوالى 20 فى المائة من مساحة اليابسة. فبالاضافة الى وجودها بقارة القطب الجنوبى فانها تنتشر بمساحات واسعة من اليابسة المحيطة بالقطب الشمالى ايضا (شكل 8 ـ 17).

وعند حدوث تغيرّ فى طبيعة السطح، مثل ازالة الغطاء النباتى أو شق الطرق أو تشييد المبانى، فان طبقة الجمد السرمدى تذوب، مما يجعل المنطقة عرضة للانزلاق والهبوط. والمشاكل العديدة الناجمة عن النشاط البشرى بالقطب الشمالى اثناء الحرب العالمية الثانية وبعدها تبين مدى الحاجة الى تفهم طبيعة الجمد السرمدى (شكل 8 ـ 18).

وما يعرف **بالتموج الانفرادى**، وهو نوع آخر من أنواع تبدد الكتل فى المناطق المبطنة بالجمد السرمدى، يمكن اعتباره نمط من أنماط الزحف، حيث تتحرك المكونات غير المتماسكة والمشبعة بالماء الى اسفل بالتدريج. ويحدث التموج الانفرادى فى نطاق يعلو طبقة الجمد السرمدى. ويسمى بالطبقة النشطة. وهى تتجمد فى الشتاء وتذوب مياهها فى الصيف. وحيث أن المياه الناتجة عن ذوبان الجليد لا تستطيع تخلل طبقة الجمد السرمدى، فان الطبقة النشطة تصبح شديدة التشبع وبالتالى تتحرك. ويمكن ان تحدث هذه الظاهرة فوق المنحدرات التى لا يزيد ميلانها على 2 الى 3 درجات. وعند تواجد غطاء نباتى قد تتحرك الطبقة العليا فى تموجات متتابعة كما هو مبين بالشكل 8 ـ 19.

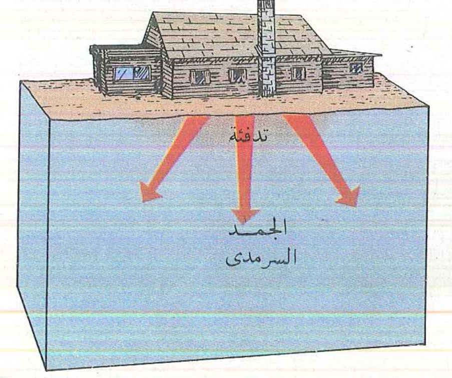


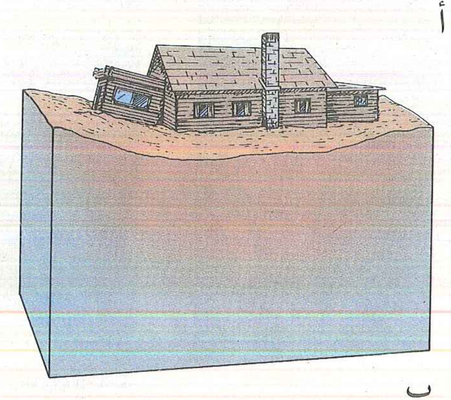
شكل 8 ـ 17

توزيع الجمد السرمدى بنصف الكرة الأرضية الشمالى.



أ





ب

شكل 8 ـ 18
منزل متأثر بالجمد السرمدى بآلاسكا. لاحظ الجانب الأيمن من المنزل والذى كانت به التدفئة قد هبط أكثر من الجانب الثانى.



شكل 8 ـ 19
ثنايا تموجية شمال غربى فير بانكس بآلاسكا.

أسئـلـة للـمـراجعـة :

1 - كيف تسبب النشاط البشرى فى كارثة مضيق فايونت؟ وهل كان من الممكن تفادى الكارثة؟

2 - اشرح كيف يعمل تبدد الكتل على تشكيل معالم سطح الأرض؟

3 - ما هى القوة الدافعة لتبدد الكتل؟

4 - كيف تؤثر المياه فى عملية تبدد الكتل؟

5 - اذكر أهمية زاوية السكون.

6 - ميّز بين السقوط والانزلاق والتدفق.

7 - لماذا يتحرك التيهور بسرعة كبيرة؟

8 - يتحرك كل من الهبوط والانزلاق الصخرى عن طريق الانزلاق. ما هو وجه الاختلاف بين هاتين الظاهرتين؟

9 - ما هى العوامل التى أدت الى الانهيال الصخرى بجروس فنتر؟

10 - قارن بين التدفق الطينى والتدفق الترابى.

11 - صف حركة تبدد الكتل التى حصلت على منحدرات جبل سانت هيلينز اثناء فترة نشاطه سنة 1980 م.

12 - حيث أن الزحف حركة بطيئة جدا، فما هو الدليل على قدرتها للتأثير فى المنحدرات؟ اشرح الدافع المؤثر لتكون مثل هذا النوع من الحركة.

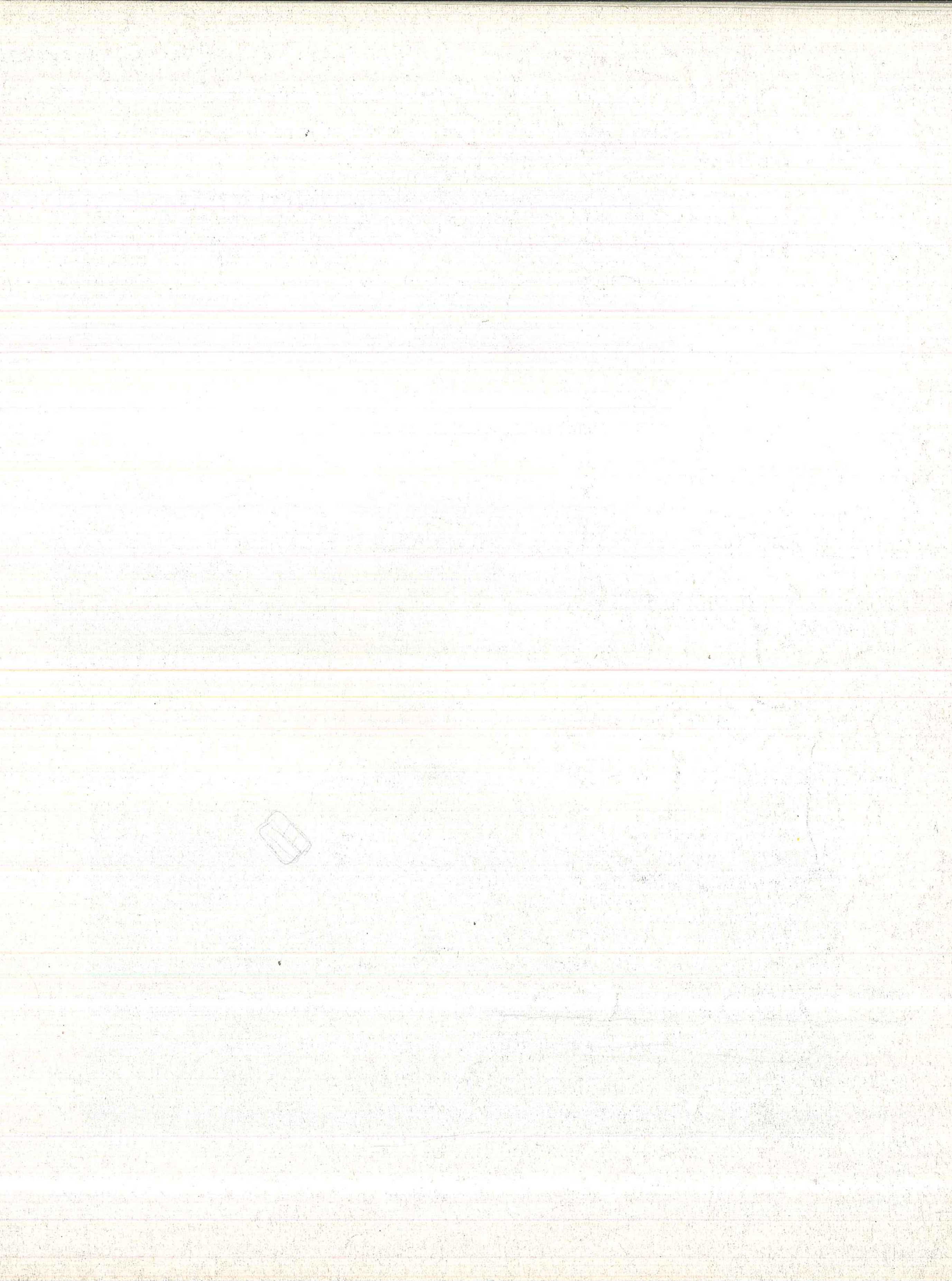
13 - ما هى طبقات الجمد السرمدى؟ أى جزء من سطح اليابسة يقع تحت تأثيره؟

14 - لماذا تتكون التموجات الانفرادية اثناء الصيف فقط؟



الكلـمـات الـدالـة :

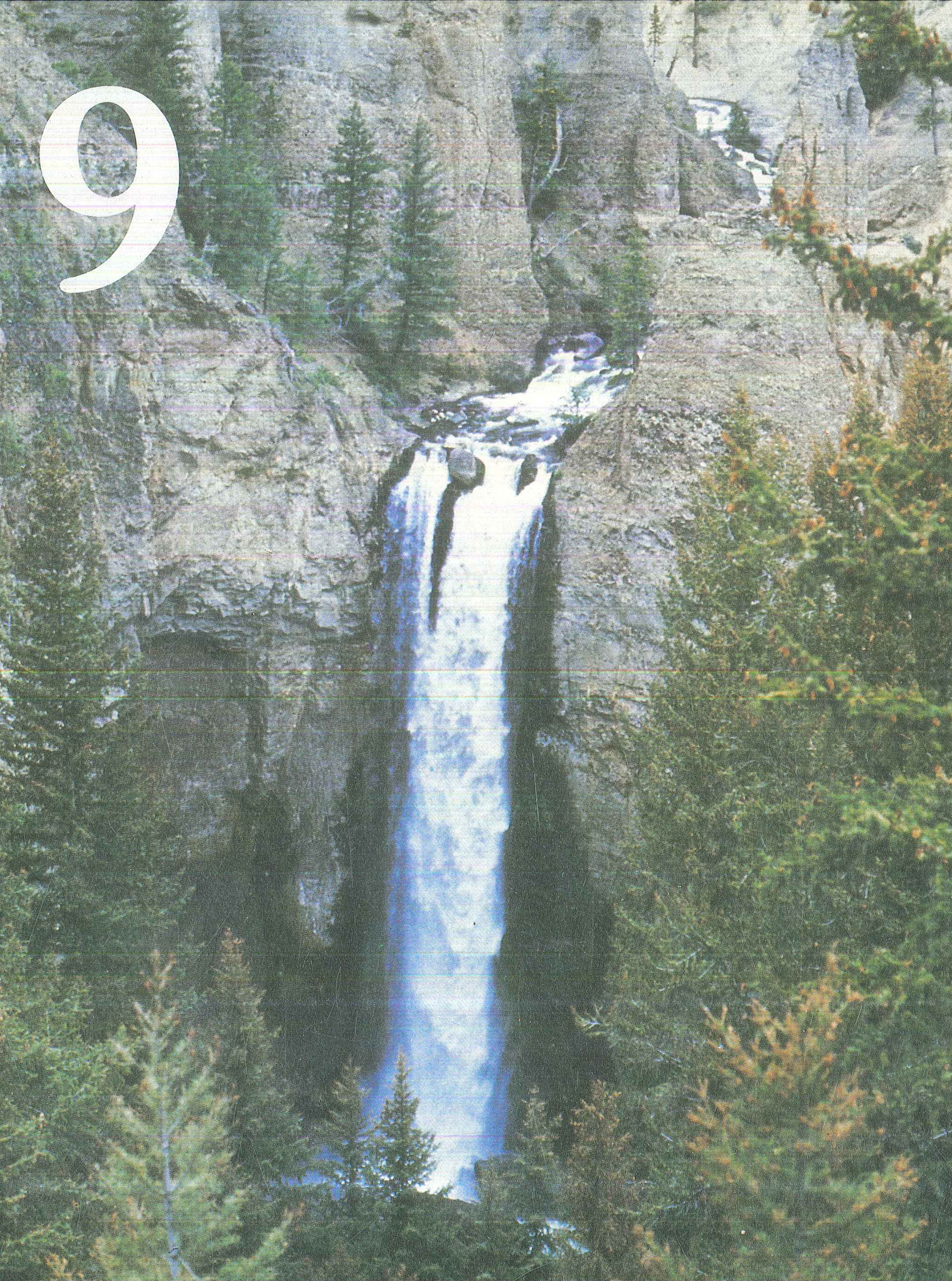
انزلاق	slide
انزلاق صخرى	rockslide
تبدد الكتل	mass wasting
تدفق	flow
تدفق ترابى	earthflow
تدفق طينى	mudflow
تموج انفرادى	solifluction
تيهور صخرى	rock a valanche
جمد سرمدى	permafrost
زاوية السكون	angle of repose
زحف	creep
سقوط	fall
هبوط	slump



9



المياه الجارية


9

الدورة المائية

المياه الجارية

- تدفق مجارى المياه
- التغيرّات التى تحدث اسفل مجرى النهر

تأثير الحركة العمرانية على كمية الدفق

مستوى القاعدة والأنهار الممهدة

تعرية المجارى المائية

نقل المجارى المائية للرسوبيات

تراكم الرسوبيات بفعل المجارى المائية

- رسوبيات القناة
- رسوبيات سهل الفيضان
- الدلتا والمراوح الركامية

أحواض المجارى المائية

شبكات نظم الصرف

- نظم الصرف
- المجارى السابقة والمركبة للمياه
- التعرية عند المصدر وقرصنة المجارى المائية

مراحل تكوّن حوض الوادى

دورة تطور تشكُل المعالم السطحية

الدورة المائية

تقدر كمية المياه على الكرة الأرضية بحوالى 1.36 بليون كيلومتر مكعب. وتحوى المحيطات وحدها حوالى 97.2 % من هذه الكمية و 2.51 % الأخرى على هيئة جليد. أما 0.65 % الباقية فتمثل البحيرات والأنهار والمياه الجوفية بالاضافة الى بخار الماء فى الغلاف الجوى. وبالرغم من ضآلة نسبة الماء فى كل من المصادر الأخيرة الا أن كميتها الفعلية ضخمة.

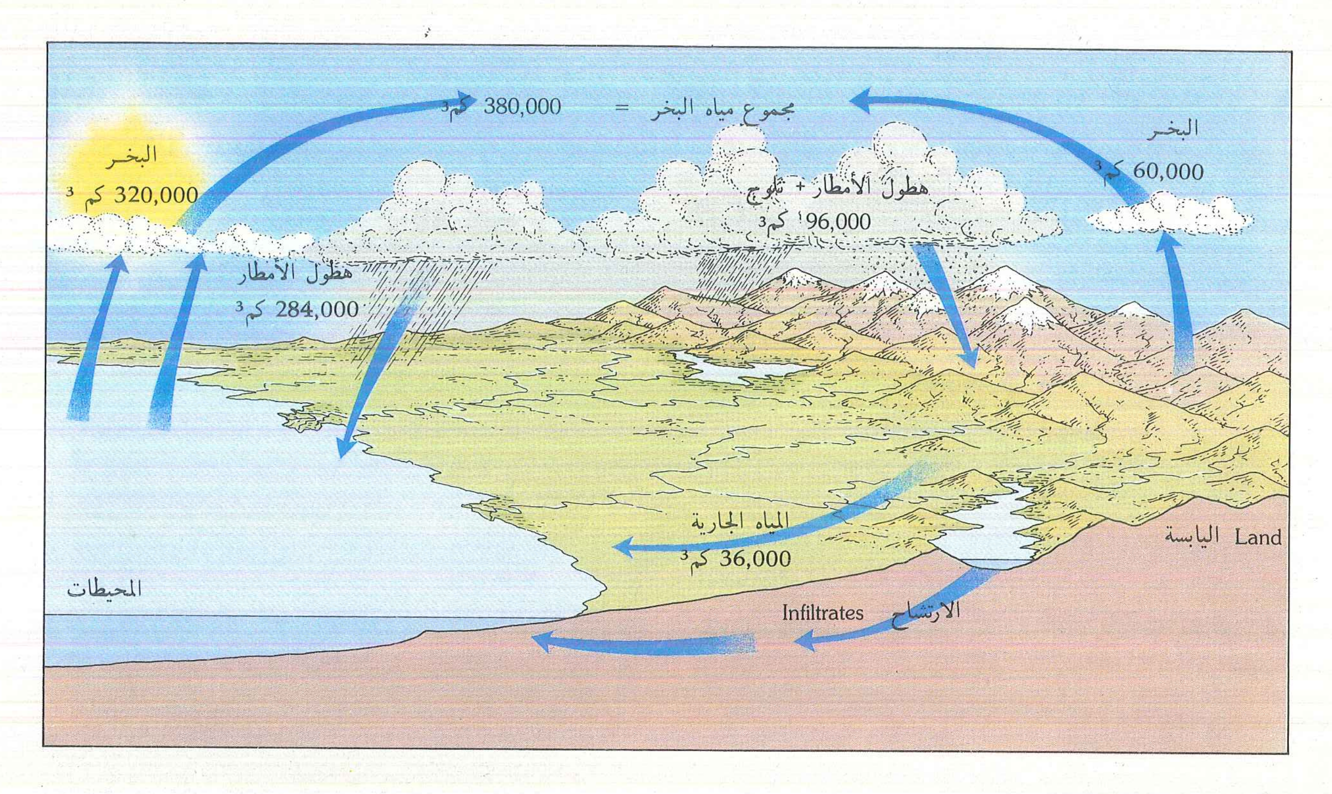
ومصادر المياه مهمة وحيوية لاستمرارية الحياة على وجه الأرض. وبزيادة الطلب على هذه الكمية المحدودة زاد اهتمام العلم باستمرارية تبادل الماء بين المحيطات والغلاف الجوى والقارات. وتعرف هذه الدورة المستمرة لمصادر الأرض المائية بالدورة المائية. وهى تستمد طاقة حركتها من الشمس. ويلعب فيها الغلاف الجوى دورا هاما للربط بين المحيطات والقارات.

ويتبخر الماء باستمرار من المحيطات بكميات كبيرة، ومن القارات بكميات أقل، نافذا الى الغلاف الجوى حيث تحمله الرياح مسافات بعيدة تتكون خلالها السحب. والمياه المتساقطة على المحيطات تكون قد أنهت دورة كاملة، بينما يلزم المياه المتساقطة على القارات الرجوع مرة أخرى الى المحيط لاستكمال هذه الدورة.

ماذا يحدث للماء حال سقوطه على اليابسة؟ ينفذ جزء منه الى داخل الأرض فى اتجاه عمودى ثم جانبى واخيرا ينساب الى البحيرات والأنهار أو مباشرة الى المحيطات. أما فى حالة ما تكون معدلات هطول الأمطار أكثر مما تستطيع أن تمتصه الأرض فان الكمية الزائدة تندفع على السطح لتكون البحيرات والأنهار. والكثير من المياه النافذة الى الأرض (المرتشحة) أو التى تجرى على السطح (الجارية) تأخذ طريقها الى الغلاف الجوى عن طريق البخر مباشرة من التربة والبحيرات والأنهار. كما أن جزءا من المياه المرتشحة تمتصها النباتات ثم تطلقها الى الغلاف الجوى فيما يعرف بالنتح. ففى هذه العملية ينتج حقل المزروعات سنويا كمية من الماء تكفى لتغطية مساحته بعمق 60 سنتيمترا. بينما تنتج الغابات ما مقداره ضعف هذه الكمية. ولأننا لا نستطيع تمييز كمية الماء الصادرة عن البخر من تلك الصادرة عن النتح فان قيمتيهما تعاملان كوحدة واحدة تسمى **النتح البخرى**.

وعند هطول المياه على ارتفاعات عالية أو مناطق قريبة من أحد القطبين فانها لا تتسرب من توّها الى باطن الأرض

شلال



شكل 9 ـ 1

معادلة الأرض المائية. يتم بخر ما مجموعه 320,000 كم^3 من ماء المحيطات. يبلغ البخر من اليابسة ما مجموعه 60,000 كم ^{3} من الماء أى ما مجموعه 380,000 كم ^{3} من ماء المحيطات واليابسة. ينزل من هذا المجموع حوالى 284,000 كم^3 على المحيطات مباشرة وحوالى 96,000 كم^3 على اليابسة. وحيث أن بخر اليابسة يقدر بحوالى 60,000 كم^3 من الماء فان الباقى والذى يقدر بحوالى 36,000 كم^3 من الماء يعمل على تعرية سطح الأرض فى طريقه الى المحيطات.

ولا تتبخر أو تجرى على السطح، بل تبقى كجزء من مَـجْالِدَ أو حقل ثلجى. فالمجالد تخزن مؤقتا كميات كبيرة من المياه بانقاصها من الدورة المائية. فاذا ما اذيبت المياه المخزنة فى المجالد فان مستوى سطح البحر سيرتفع عشرات الأمتار ليغمر مناطق ساحلية كثيرة آهلة بالسكان. وكما سنرى فى الفصل 11 فان عدة كتل جليدية قارية قد تكونت وذابت عدة مرات على مدى المليونى سنة الماضية، وهى بذلك تقوم باخلال انتظام الدورة المائية.

ويمثل الرسم المبين بالشكل 9 ـ 1 الموازنة المائية أو التقييم الكمى للدورة المائية. وبينما يلاحظ أن كمية الماء المتواجدة فى أى وقت من الأوقات على هيئة بخار تكون ضئيلة جدا الا أن كمية الماء التى تمر بالغلاف الجوى على هيئة بخار سنويا تقدر بحوالى 380,000 كيلومتر مكعب.

وحيث أن كمية البخار بالغلاف الجوى تبقى ثابتة، تقريبا فان كمية المياه المتساقطة على الأرض تساوى كمية البخر. غير أن كمية المياه المتساقطة على القارات مجتمعة تفوق بكثير كمية البخار المغادر لها. وبالعكس فان كمية البخر بالمحيطات تزيد بكثير عن كمية المياه المتساقطة

عليها. وحيث أن مستوى سطح البحر لا يتناقص باستمرار فان المياه الجارية يجب أن تعادل النقص فى المياه المتساقطة على المحيطات.

ويعد الدور الذى تقوم به كميات المياه المقدرة بحوالى 36,000 كيلومتر مكعب، والتى تتدفق سنويا فوق السطح تجاه المحيطات ضخما جدا. فقد احسن آرثر بلوم فى وصفها حيث كتب:

يقدر معدل ارتفاع القارات عن مستوى سطح البحر بحوالى 823 مترا فاذا افترضنا ان 36,000 كيلومتر مكعب من المياه الجارية تندفع سنويا على منحدر ارتفاعه 823 مترا فان القوة الناجمة عن ذلك تولد ما مقداره 9×10^{9} كيلوات. فاذا ما استعملت هذه القوة لتعرية سطح الأرض، فانها تعادل عمل حصان يجر مكشطة أو مجرفة بحقل مساحته حوالى الفى متر مربع ليلا ونهارا طوال السنة. وبالطبع فان جزءا كبيرا من الطاقة الكامنة للمياه الجارية يفقد فى صورة حرارة ناتجة عن حركة المياه العنيفة وتناثرها.

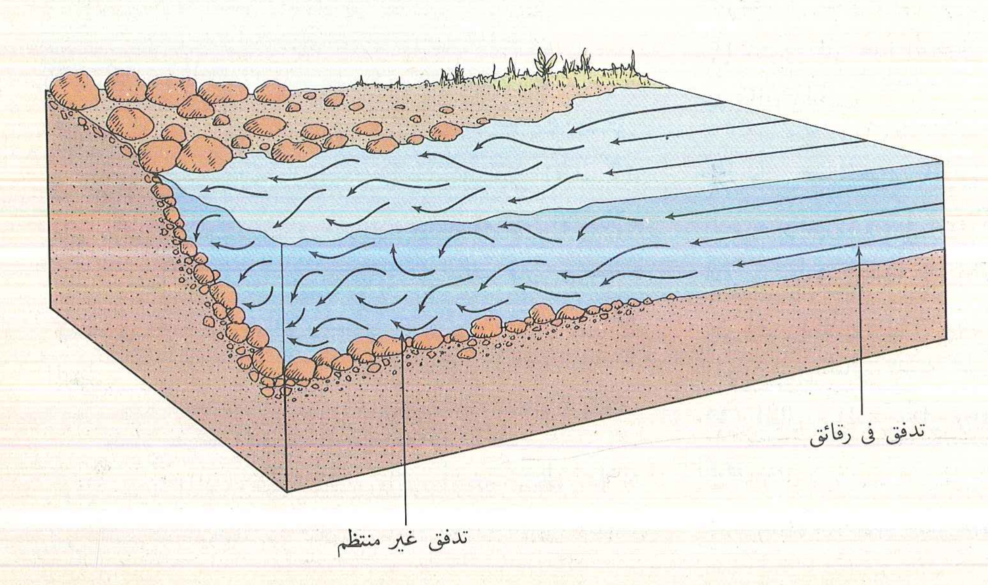
وبالرغم من أن نسبة بسيطة من طاقة المياه الجارية تعمل على التعرية فانها تعتبر من أهم العوامل المساهمة فى تشكيل وتهذيب سطح الأرض.

وباختصار فان الدورة المائية تمثل حركة الماء الدائمة من المحيطات الى الغلاف الجوى، ثم ثانية الى الأرض، ومنها يأخذ الماء مساره الى المحيطات. ويعزى تشكيل سطح الأرض وتعريتها بقدر كبير الى الخطوة الأخيرة من هذه الدائرة، والتى سيتم التركيز عليها فى بقية هذا الفصل.

المياه الجارية

للمياه الجارية تأثير مهم فى حياة البشر. فيعتمد على الأنهار فى توليد الطاقة وفى النقل بالاضافة الى عمليات الرى. وقد لعبت التربة الخصبة المنقولة بفيضاناتها دورا هاما فى تقدم الانسان منذ فجر الحضارة الأول. كما لعبت هذه المجارى المائية دورا هاما فى تحوير سمات البيئة الطبيعية من حولنا.

وبالرغم من الاعتماد الدائم للانسان على المياه الجارية، الا أن مصادرها قد حيرته منذ القدم. ولم يتفهم أن الانهار كانت تمتد مياهها من المياه الجارية والباطنية، واللتان يتم



شكل 9 ـ 2

يمكن ان يحدث التدفق فى رقائق فقط عندما تتحرك المياه ببطء فى قناة ملساء. وعندما تزيد السرعة أو تصبح القناة خشنة فان التدفق فى رقائق يتحول الى تدفق غير منتظم. وعمليا تتدفق المياه فى جميع المجارى المائية فى صورة غير منتظمة.

تغذيتها بمياه الأمطار والثلوج، الا بحلول القرن السادس عشر.

وتبدأ المياه الجارية حركتها فى صفائح رقيقة وعريضة فيما يسمى **بالتدفق الصفْحى**. وتعتمد كمية الماء المتحركة بهذه الكيفية، بدلا من تسربها الى باطن الأرض، على سعة التسرب للتربة. وتعتمد سعة التسرب على عوامل عدة تشمل: (1) شدة ومدة الأمطار و(2) رطوبة التربة السابقة و(3) بنية التربة و(4) ميل السطح، و(5) الغطاء النباتى. فعند تشبع التربة ينساب الماء فى صفيحة لا يتعدى سمكها البضعة ملليمترات. وتبقى هذه الصفيحة المتحركة دون احتوائها فى مسارات مدة قصيرة تبدأ بعدها فى تكوين خيوط من التيارات، ثم قنوات صغيرة تسمى **الجداول** لينتقل الماء بعدها الى المجرى المائى.

وتستعمل كلمة المجرى المائى هنا للدلالة على القنوات المائية صغيرها وكبيرها. وتستعمل كلمة النهر للدلالة على مجرى مائى تصب فيه عدة روافد. وسيتم التركيز فى باقى هذا الفصل على جزء الدورة المائية ذى العلاقة بالمجارى المائية وحركة مياهها. وستتم مناقشة مميزات مجارى المياه فى المناطق الرطبة، غير انها كما سنرى بالفصل 12، لها أيضا أهمية ودور فعال فى المناطق الجافة.

تدفق مجارى المياه

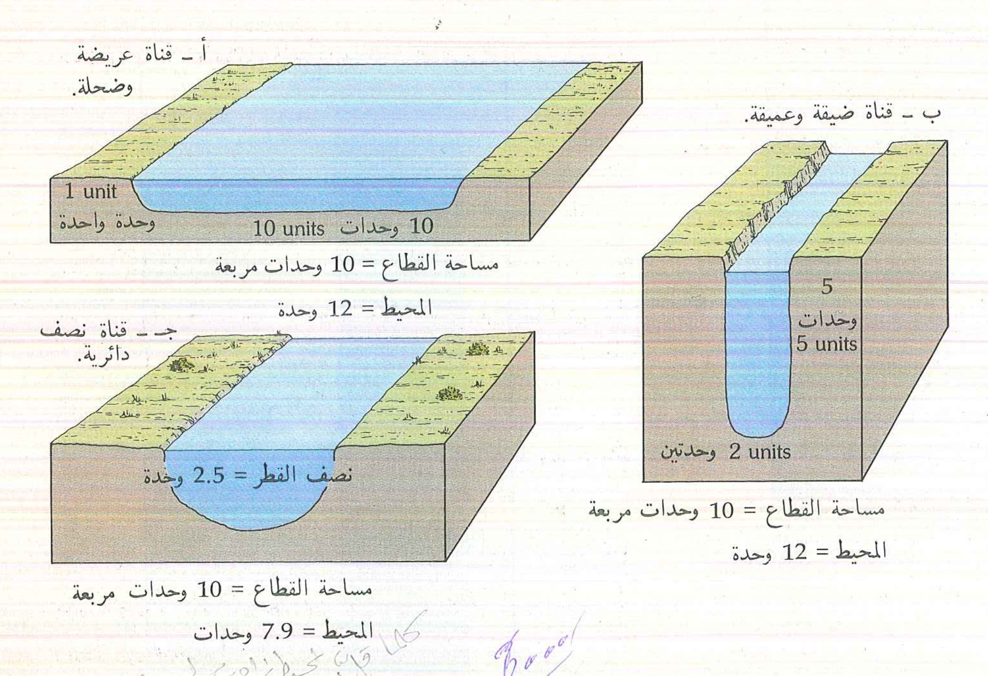
قد ينساب الماء بالمجارى المائية بأحد طريقتين: **تدفق فى رقائق وتدفق غير منتظم**. وكما يبين الشكل (9 ـ 2)، فان جزئيات الماء تتحرك فى مسارات مستقيمة دون الاختلاط عند تدفقها فى رقائق. وبالعكس من ذلك فان جزيئاته تندفع فى اتجاهات مختلفة وبصورة عشوائية عند التدفق غير المنتظم.

وتعتبر سرعة المجرى المائى العامل الرئيسى الذى يقرر نوعية حركة الماء فى كونها تدفق رقائقى أو غير منتظم. فلا بد من السرعة البطيئة فى قناة ملساء لامكانية تدفق الماء فى رقائق. وعند زيادة السرعة أو ان المجرى يصبح خشنا، فان التدفق فى رقائق يتحول الى تدفق غير منتظم. وعادة ما تتحرك المياه فى مجاريها بسرعة تجعل تدفقها غير منتظم. وتعمل حركة الماء فى الاتجاهات المختلفة على تعرية قناة المجرى، وكذلك الحيلولة دون ترسب حمولتها المعلقة.

ويأخذ الماء طريقه فى المجارى المائية الى البحر تحت تأثير الجاذبية. ويعتمد زمن هذه الرحلة على سرعة الماء داخل المجرى، التى تقاس بالمسافة التى يقطعها الماء خلال وحدة زمنية معينة. فبعض المجارى المائية البطيئة لا تزيد سرعتها على كيلومتر واحد فى الساعة بينما بعض مجارى المياه السريعة قد تزيد سرعتها على 30 كيلومتراً فى الساعة. وتقدر السرعة عند محطات قياس عديدة على عرض المجرى، وتحسب السرعة بأخذ معدل هذه القراءات، حيث أن سرعة الماء ليست واحدة داخل قناة المجرى. فعندما تكون القناة مستقيمة تكون اقصى سرعة للمجرى عند منتصفه، تحت السطح بقليل، حيث أن قيمة الاحتكاك هنا اقل ما يمكن. وعلى العكس من ذلك فان السرعة تكون عند حدها الأدنى عند الجوانب وقاع القناة، حيث ان قيمة الاحتكاك تكون عند حدها الأقصى. ولا يكون نطاق السرعة القصوى فى وسط القناة اذا كانت منحنية أو متعرجة، بل يتحول الى الخارج عند كل ثنية من ثنايا القناة. وكما سنرى فان هذا التحول يلعب دورا مهما فى تعرية القناة عند ذلك الجانب.

ولسرعة المجرى المائى علاقة مباشرة بمقدرته على التعرية والنقل. وعليه فان للسرعة أهمية كبرى، حيث أن تغيّر بسيط فى قيمتها يؤدى الى التغيّر فى كمية حمولة المجرى من الرسوبيات. وتدخل عدة عوامل فى تحديد سرعة المجرى، وبالتالى قدرته على التعرية. وتشمل هذه العوامل: (1) المهال و(2) شكل وحجم وخشونة القناة و(3) كمية الدفق.

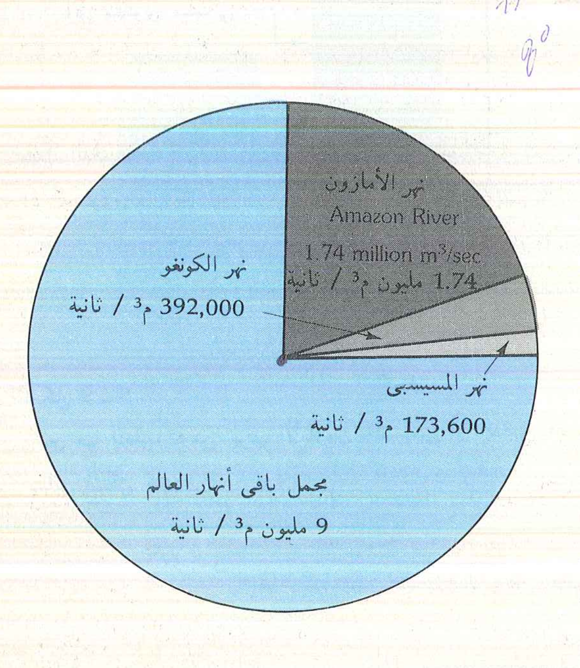
وبالتأكيد فان اكثر هذه العوامل وضوحا هو المهال أو



شكل 9 ـ 3

تأثير شكل القناة على السرعة. بالرغم من تساوى القطاع المستعرض لجميع القنوات فان القناة نصف الدائرية بها أقل كمية من الماء على اتصال مباشر بالمحيط وعليه بها قيمة من الاحتكاك أقل مما يجعل الماء يتحرك بها أسرع من القناتين الأخريين مع العلم ان باقى المعطيات متساوية.

قيمة منحدر المجرى. وهو يعرف بمقدار الانخفاض العمودى للمجرى بالنسبة الى مسافة ثابتة. ويختلف المال من مجرى الى آخر، كما يختلف من مكان الى آخر على طول المجرى الواحد. وعلى سبيل المثال يقدر ممال الجزء السفلى من نهر المسيسبى بحوالى عشرة سنتمترات للكيلومتر الواحد او أقل. وعلى العكس فانه يبلغ ممال القنوات المائية الجبلية أكثر من 40 مترا للكيلومتر الواحد. اى أكثر من 400 ضعف ممال نهر المسيسبى. وكلما زاد المال كلما زادت طاقته على التدفق. فاذا كان هناك مجريان متماثلان فى خصائصهما عدا المال، فان المجرى الأكثر ممالا ستكون سرعته اكبر من المجرى الأقل ممالا.



شكل 9 ـ 4

يساوى تدفق نهر الأمازون 10 أضعاف تدفق نهر المسيسبى (اكبر أنهار امريكا الشمالية) كما يساوى 15 فى المائة من مجموع تدفق المياه العذبة لجميع أنهار العالم.

ويقرر شكل القناة كمية الماء التى على اتصال مباشر بسطح المجرى، وبالتالى شدة مقاومة الاحتكاك. وانسب اشكال القنوات ذو الحد الادنى لمحيط قطاعه. ويبين الشكل (9 ـ 3) ثلاثة أنواع من القنوات. وبالرغم من ان مساحات قطاعاتها متساوية، فان القناة النصف دائرية بها كمية من الماء ملامسة لقناتها اقل من القناتين الأخريين وبالتالى فان شدة الاحتكاك بها اقل. ونتيجة لذلك فانه اذا تساوت كل

مقارنة الدفق:
الأمازون عند الأوبيدوس
والمسيسيبى عند فيكسبورج

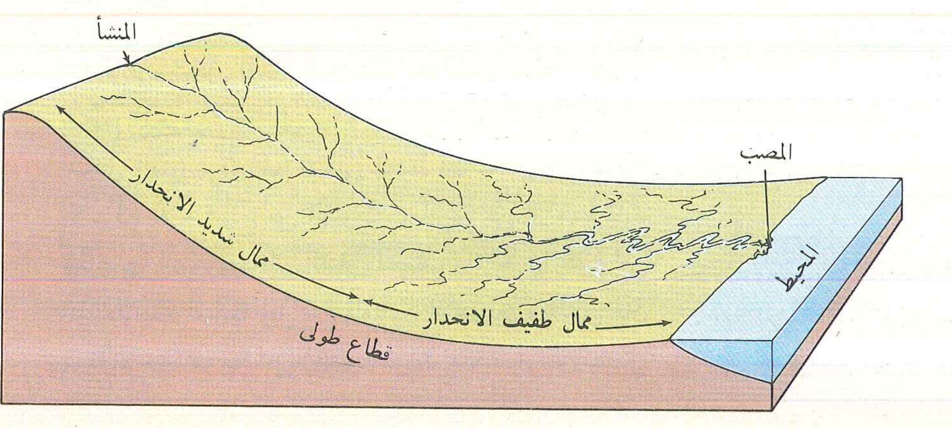
اعلى مستوى فيضانى
معدل الدفق
أقل مستوى فيضانى
معدل الدفق
أقل مستوى

الدفق بملايين الأمتار المكعبة فى الثانية
3.5 — 3 — 2.5 — 2 — 1.5 — 1 — .5 — 0
الأمازون
المسيسبى

شكل 9 ـ 5
تبين هنا المعلومات من نهرى الأمازون والمسيسبى أن الدفق قد يتباين بشكل كبير.

العرض (أقدام)
العمق (أقدام)
السرعة (قدم / ثانية)
الدفق (قدم.3 / ثانية)
10 — 100 — 1000 — 10,000 — 100,000

شكل 9 ـ 6
علاقة العرض والعمق والسرعة بكمية دفق نهر الباودر بولاية مونتانا الأمريكية. فبزيادة الدفق يزيد العرض والعمق والسرعة على التوالى.



شكل 9 ـ 7
قطاع طولى بطول النهر. لاحظ تقعر خط المسار مع شدة انحداره أول المجرى وقلة الممال أسفله.

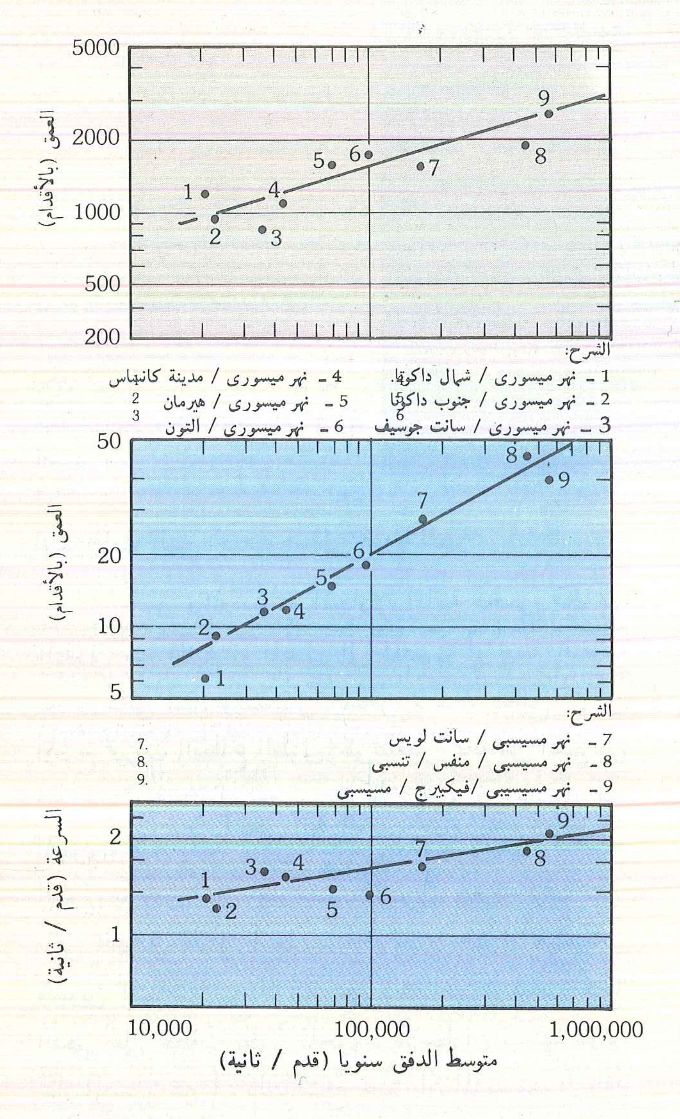
العوامل الاخرى فان سرعة الماء ستكون اكبر فى القناة النصف دائرية.

ويؤثر كذلك حجم القناة وخشونة سطحها فى شدة الاحتكاك. فزيادة حجم القناة تنقص من نسبة المحيط الى مساحة القطاع العرضى، وبالتالى تزيد من قوةاندفاع الماء. أما تأثير خشونة القناة فهو واضح، حيث أن القناة الملساء تسمح بتدفق متناسق. بينما القناة الخشنة والمملوءة بجلاميد الصخر تحدث تدفقا غير منتظم، وبالتالى تعيق حركة الماء داخل القناة.

وتعرّف كمية الدفق بمجرى مائى، بكمية الماء المندفعة عند نقطة معينة من النهر خلال وقت معين (يقاس عادة بالامتار المكعبة أو الاقدام المكعبة فى الثانية). ويحسب الدفق بضرب مساحة قطاع القناة فى سرعة الماء : كمية الدفق ($م^3$ / ثانية) = عرض القناة (أمتار) × عمق القناة (أمتار) × السرعة (متر / ثانية).

وعلى سبيل المثال فان كمية دفق نهر المسيسبى تقدر بحوالى 17,715 مترا مكعبا فى الثانية. وبالرغم من ضخامة هذه الكمية الا انها لا تقارن بكمية نهر الامازون، وهو اكبر الانهار فى العالم، التى تفوقها بأكثر من عشرة اضعاف (شكل 9 ـ 4). وعلى كل حال فان كمية دفق نهر الامازون تقدر بحوالى 15 بالمائة من مجموع دفق المياه الحلوة الى جميع محيطات العالم. فدفق يوم واحد فقط يكفى مثلا لاستهلاك مدينة نيويورك لمدة تسع سنوات.

وكما يوضح الشكل 9 ـ 5 فان تدفق نهرى الامازون والمسيسبى يتباينان بتباين كمية الامطار أو المياه الناتجة عن ذوبان الجليد. واذا ما تغيرت كمية الدفق فان العوامل التى سبق ذكرها تتغير تباعا. فزيادة الدفق ينجم عنها زيادة عرض أو عمق القناة، أو قد ينتج عنها زيادة السرعة، أو قد تتغير هذه المعطيات فى مجموعات مختلفة. فقد بينت القياسات ان زيادة الماء تؤدى الى زيادة عرض وعمق القناة وسرعة الماء على التوالى (شكل 9 ـ 6). ولتسيير أمر الماء



شكل 9 ـ 8

كما توضح المعلومات المتحصل عليها عند نقاط عدة بنهرى ميسورى والمسيسبى فان قيمة الدفق والسرعة وعمق القناة وعرضها تزيد بزيادة المسافة تجاه مصب المجرى.

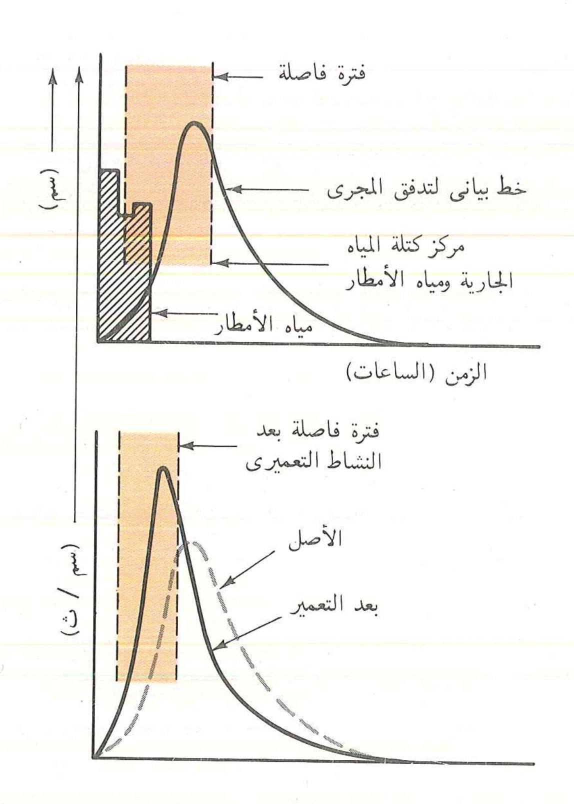
الزائد يعمل المجرى المائى على زيادة عرض وعمق قناته. وكما رأينا اعلاه فان زيادة حجم القناة تعنى ان نسبة اقل من الماء ستكون ملامسة للقناة، مما يعنى نقصان شدة الاحتكاك بقاع وجوانب القناة. وبالتالى فان نقصان شدة الاحتكاك ينتج عند تدفق اكثر تناسقا.



شكل 9 ـ 9
فيضان نهر توبيكا بكانساس فى الصيف (يوليو) سنة 1951 .

التغييرات التى تحدث اسفل مجرى النهر

من أحد فوائد دراسة المجارى المائية فحص قطاعها الطولى من المنبع أو المصدر الى المصب أو نقطة التقائه بجسم مائى آخر. وبتفحص الشكل 9 ـ 7 يتضح أن من أوضح مميزات القطاع الطولى، هو تناقص مماله من المنبع الى المصب. وباستثناء بعض عدم الانتظام فى أجزاء من المجرى، فانه يأخذ شكل منحنى مقعر. ويبين القطاع الطولى تناقص المهال تجاه مصب المجرى. ولمعرفة كيف تتغير باقى العوامل اسفل المجرى، فانه يلزم بعض القياسات وتدوين المشاهدات الدالة على ذلك. فعند قياس كمية الدفق على محطات بطول المجرى، يلاحظ أن قيمتها تتزايد تجاه المصب. غير أن ذلك متوقع حيث ان المزيد من الروافد تلتحق بالمجرى الرئيسى كلما اقتربنا من مصبه. وبالاضافة الى ذلك فانه فى المناطق الممطرة تضاف كميات من الماء باستمرار من المياه الباطنية الى المجرى الرئيسى. وبناء عليه فان عرض وعمق المجرى وسرعة مياهه يجب أن تتغير كاستجابة لزيادة حجم الماء داخل المجرى. وقد تبين أن التغيرات فى هذه العوامل التى تحدث اسفل المجرى تتفاوت بطريقة مماثلة لما يحدث عندما يزداد التدفق فى مكان ما على طول المجرى، أى أن المجرى يزيد بانتظام فى العرض والعمق والسرعة. ويوضح الشكل 9 ـ 8 هذه المتغيرات بجزء من نهرى ميسورى والمسيسبى.



شكل 9 ـ 10
رسم بيانى لوضع مائى عام. (أ) ـ الفترة الفاصلة بين زمن هطول المطر وحدوث الفيضان. (ب) ـ نقص الفترة الفاصلة وارتفاع مستوى الفيضان نتيجة للنشاط العمرانى.

والزيادة فى سرعة تدفق الماء اسفل المجرى تتضارب والمفهوم العام عن المياه المندفعة بالمسالك الجبلية من جهة والانهار العريضة الرائقة فى المناطق المنبسطة من جهة اخرى. ففى الوقت الذى تظهر فيه المجارى الجبلية وكأنها السيل الجارف فان معدل سرعتها غالبا ما تكون اقل من سرعة الماء بالقرب من المصب. ويعزى هذا الاختلاف الى نظام الصرف بالقناة الاكثر اتساعا اسفل النهر.

وعند بداية المجرى حيث الانحدار الشديد يتدفق الماء فى مجرى ضيق نسبيا ومزدحم بالجلاميد الصخرية مما يعيق حركته ويدفعه فى اتجاهات مختلفة. وبعد مسافة اسفل المجرى يقل حجم مواد القاع مما يقلل من مقاومة التدفق بالاضافة الى ان اتساع المجرى وزيادة عمقه تزيد من ملاءمته للزيادة فى كمية التدفق.

وباختصار فقد رأينا ان هناك تناسباً عكسياً بين المهال وكمية الدفق، فكلما كان المهال عاليا تناقص الدفق وكلما كان الدفق قويا تضاءل المهال. وبمعنى آخر يستطيع المجرى المائى ان يبقى على سرعة عالية بالقرب من المصب بالرغم من ضآلة مهاله مقارنة بجزء من المجرى العلوى وذلك لزيادة كمية الدفق وقناته الملساء (القاع) والمتسعة.

تأثير الحركة العمرانية على كمية الدفق

عند هطول الأمطار تزيد قيمة الدفق، وبالتالى تزيد كمية الماء على مقدرة القنوات لاحتوائها، حيث ينساب الماء على الضفتين فى شكل فيضان (شكل 9 ـ 9). والفيضانات ظاهرة طبيعية متوقعة غير ان شدة الفيضانات تزيد بزيادة تعمير المدن.

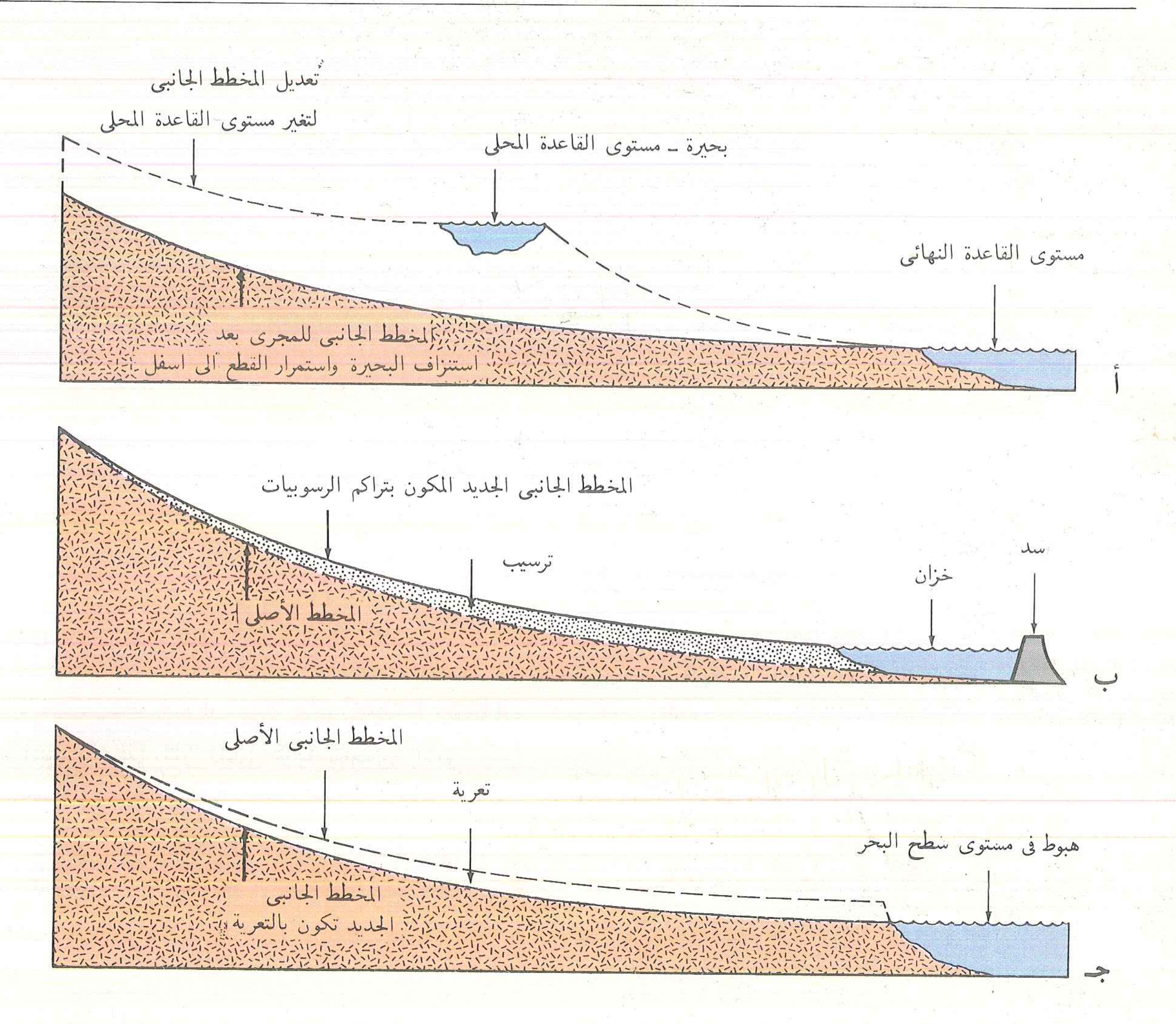
ويمثل الشكل (9 ـ 10 أ) حالة فرضية توضح علاقة توقيت العاصفة المطرية بحدوث الفيضان. لاحظ أن مستوى الماء فى المجرى لا يرتفع بمجرد هطول المطر، حيث ان الماء يحتاج الى وقت ليتحرك من مكان نزوله الى المجرى. ويسمى هذا الوقت **الفترة الفاصلة**.

وعند تحول مساحة غير عامرة الى موقع نشاط عمرانى، فان ذلك يؤثر على مجارى مياهها. ويمثل الشكل (9 ـ 10 ب) مدى هذا التأثر. حيث ان قمة منحنى الدفق عند حدوث الفيضان تكون اعلى بعد النشاط العمرانى من قمة المنحنى قبل ذلك. فرصف الشوارع والمحطات وتشييد المبانى، يغطى مساحة من السطح كان ينفذ من خلالها جزء من الماء الى باطن الأرض، مما ينقص من كمية المياه المرتشحة، ويزيد من مقدار الدفق، وحيث ان قيمة كمية المياه النافذة الى باطن الأرض قليلة فان الانسياب فى مجارى المياه بالمدن التى يتم امدادها من المياه الباطنية يكون ضئيلا جدا. وكما يتوقع فان درجة تأثير هذه العوامل تتناسب ومساحة الأراضى ذات السطح عديمة النفاذية. والنشاط العمرانى هو فقط احد الامثلة لاعاقة الانسان للمسارات الطبيعية للمياه. فهناك عدة وسائل لاعاقة المجارى المائية بسبب تعمير الاراضى، كما ان الانسان يحاول بعدة طرق التحكم فى سير هذه المجارى والتى سيتم التعرض للبعض منها فى بقية هذا الفصل.

مستوى القاعدة والأنهار الممهدة

فى سنة 1875 اشار الجيولوجى جون ويسلى بول الى ان هناك حداً لا يتعداه النهر فى تعريته لقاعدته والذى اسماه **بمستوى القاعدة**. وبالرغم من ان الفكرة واضحة غير انها مهمة جدا فى دراسة نشاط مجارى المياه. ويعرف مستوى القاعدة بأقل نقطة يمكن ان يصل اليها النهر فى تعرية قناته. وهذا المستوى يمثل مستوى دخول المجرى المائى للمحيط أو البحيرات أو مجرى مائى آخر. ويعزى ضآلة المهال عند مصب المجارى المائية الى مستوى القاعدة، حيث أن المجرى يقارب وصوله الى المستوى الذى لا يستطيع النزول عنه. وقد وجد بول نوعان من مستوى القاعدة حيث كتب:

يمكننا اعتبار مستوى سطح البحر مستوى القاعدة الاكبر حيث انه لا يمكن تعرية اليابسة

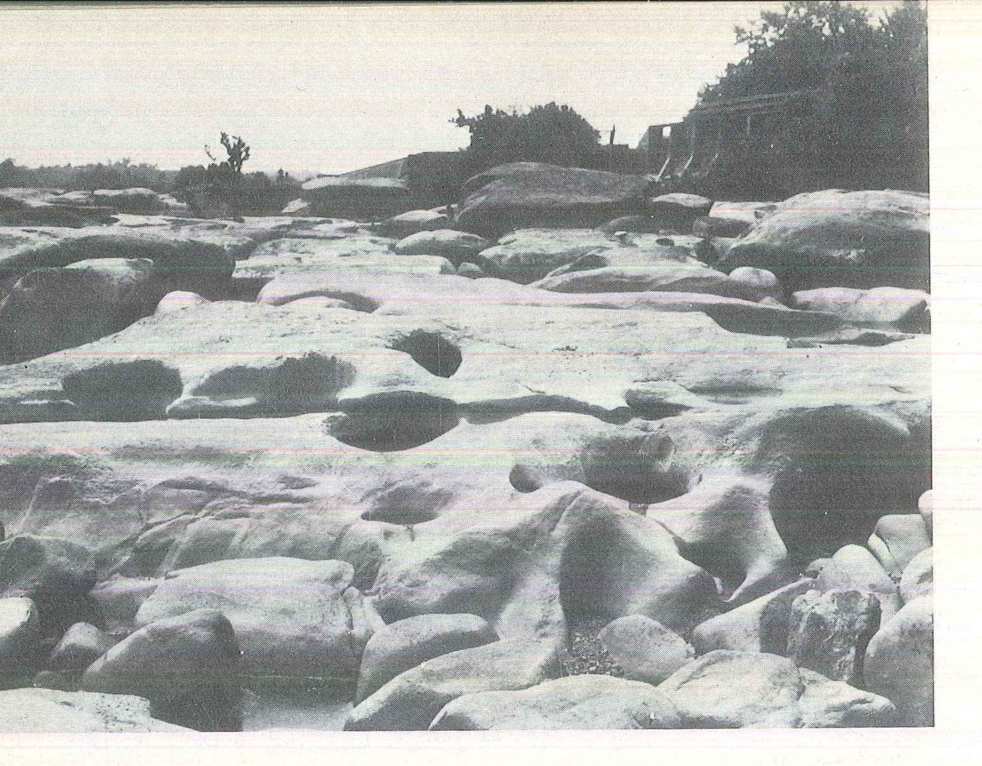


شكل 9 ـ 11

(أ) ـ تأثير مستوى القاعدة المؤقت على المخطط الجانبى للمجرى. (ب) ـ التعديلات فى مخطط المجرى نتيجة التغير فى مستوى القاعدة. (جـ) ـ التعديلات التى تحصل بانخفاض مستوى القاعدة.

دون مستواه ولكننا قد نجد ولأسباب مؤقتة عدة مستويات اخرى....

ويشار الآن الى مستوى سطح البحر الذى اسماه بول بمستوى القاعدة الأكبر **بمستوى القاعدة النهائى**. أما **مستوى القاعدة المحلى أو المؤقت** فيشمل البحيرات والصخور ذات المقاومة العالية، الى جانب مجارى المياه، الرئيسية التى تعمل كمستوى قاعدة لروافدها. ولكل هذه المستويات الامكانية على الحد من مقدرة المجرى على التعرية الى حد ما. فمثلا عند دخول مجرى مائى الى بحيرة فان سرعته سرعان ما تقارب الصفر وبالتالى تحد من قدرته على التعرية تحت مستوى سطح الماء بالبحيرة، وذلك بأى نقطة على طوال المجرى قبل البحيرة (شكل 9 ـ 11 أ). وقد لا ينظر الى البحيرات أو الصخور الصلبة على انها مؤقتة ولكنها تعتبر جيولوجيا وعلى المدى الطويل ظواهر غير دائمة. فحتى البحيرات الكبيرة تعمل متنفساتها المائية على





شكل 9 ـ 12

(أ) ـ فجوات دردورية بمجرى نهر جيمز تم الكشف عنها وقت انخفاض مستوى الماء بالنهر. (ب) ـ تعمل الحصى فى حركة دائرية تشبه آلة الثقب وذلك لتكوين الفجوات الدردورية.

استنزاف مخزونها عن طريق تعميق قنواتها. وعلى المدى الطويل تعمل مجارى المياه على تعرية هذه القنوات مهما كانت صلابة قاعدتها. وعليه فان البحيرات والصخور تعمل كعوائق مؤقتة لتعميق المجرى المائى لقناته.

وأى تعديل فى مستوى القاعدة ينجم عنه رد فعل لمعادلة نشاط النهر. فعند بناء سد على مجرى أحد الأنهار فان الماء المتجمع خلف السد يعمل على رفع مستوى القاعدة بالنهر (شكل 9 ـ 11 ب)، وعليه فان الممال تجاه مصدر النهر فوق مستوى السد ينخفض مسببا نقصان السرعة وبالتالى قدرته على حمل الرسوبيات. وهنا يكون النهر غير قادر على نقل كل حمولته، ومن ثم يرسبها فى عملية رفع لمستوى مجراه.

وتستمر هذه العملية حتى يصل النهر مرة اخرى الى المهال الذى يمكنه من نقل حمولته. وسيكون القطاع الجانبى الجديد مماثلا لما كان عليه القطاع القديم، فيما عدا كونه اكثر منه ارتفاعا نسبة الى مستوى البحر.

واذا ما حصل انخفاض فى مستوى القاعدة، اما بارتفاع مستوى الأرض أو انخفاض مستوى سطح البحر، يعمل النهر مرة اخرى على معادلة ذلك. وهنا يكون النهر اعلى من مستوى القاعدة وذو طاقة اضافية وعليه سيتجه الى قطع وخفض مستوى قناته (شكل 9 ـ 11 جـ). وتبدأ التعرية هنا بالقرب من مصبه النهرى، وتتجه الى اعلاه حتى يتم تعديل شكل القطاع الجانبى على طول المجرى.

وملاحظة تعديل مجرى مائى لقطاعه كرد فعل لأى تغيير فى مستوى القاعدة قد ادى الى التوصل الى فكرة الانهار الممهدة. فالنهر الممهد ذو منحدر متناسب مع باقى مواصفات القناة الكافية فقط لنقل حمولته. وعموما فان النهر الممهد لا يعمل على التعرية ولا الترسيب ولكنه يكتفى بنقل حمولته. وعند وصول مجرى مائى الى حالة التعادل يصبح ذو قدرة تنظيمية ذاتية حيث ان اى تعديل فى أحد معطياته ينجم عنه رد فعل من باقى المعطيات لمعادلته. وبالرجوع مرة اخرى الى مثالنا اعلاه، لحالة النهر الذى يعمل على معادلة هبوط مستوى قاعدته، نجد انه لن يصبح ممهدا اثناء عملية تعميقه لمجراه وذلك حتى تتوقف هذه العملية.

تعرية المجارى المائية

قد تقوم المجارى المائية بتعرية قنواتها بعدة طرق: برفع المواد غير المتاسكة وبواسطة الكشط أو عن طريق الاذابة. ولا تعتبر الطريقة الاخيرة ذات اهمية كبيرة. فبالرغم من ان اذابة بعض مكونات القناة الصخرية قد يساهم فى تعريتها، الا ان معظم المواد الذائبة فى مياه المجارى المائية مصدرها المياه الجوفية.

وكما عرفنا فيما سبق ان حركة الماء غير المنتظمة ينتج عنها انطلاق الماء فى دوامات واتجاهات مختلفة. و مثل هذه الحركة تعمل، عندما تكون بقوة كافية، الى اقتلاع جزئيات مكونات القناة وترفعها وسط المياه المندفعة. وبهذه الطريقة تعمل قوة المياه الجارية على تعرية المواد عديمة التماسك المحكم. وكلما زادت قوة تيار الماء كلما زادت مقدرته على التعرية. وفى بعض الاحيان يتم دفع الماء بقوة خلال الشقوق وبين السطوح الطبقية ليخلع اجزاء من مكونات قاع قناة المجرى الصخرية.

وبملاحظة مجرى مائى عكر يتبين مقدرة التيارات المائية على رفع ونقل حطام الصخر، غير ان مقدرة المجرى على تعرية الصخور الصلبة ليست واضحة بنفس المقدار، وكما ان ورق السنفرة أو الورق المرمل قادر على اذابة قطعة من الخشب فان الجزئيات الصلبة التى يحملها الماء (وبخاصة الرمل والجرول) قادرة على كشط قاعدة القناة الصخرية. وكثير من الممرات الضيقة الشديدة الانحدار، والتى تم قطعها بواسطة القذف المتواصل للحبيبات تجاه قاعدة المجرى وجانبيه، لخير دليل على مقدرتها على التعرية. وبالاضافة الى ذلك فانه يتم كشط الحبيبات المحمولة بدفعها قبال بعضها البعض، أو بارتطامها بجانبى المجرى. وعليه فبواسطة الاحتكاك والكسر والدفع والقذف يعمل الكشط على تعرية الطبقات وبالتالى صقل وتشذيب جزيئات الصخر.

وتوجد بالكثير من قيعان المجارى فجوات دائرية تعرف **بالفجوات الدردورية** (شكل 9 ـ 12) وهى تتكون بحركة الحصى والرمال فى شكل دوامة، حيث تعمل حركتها الدائرية كأداة قطع لحفر هذه الفجوات. وعند تلاشى حبيبات الرمل والحصى يتم استبدالها بعدد آخر فى عملية مستمرة لحفر قاع المجرى لينتج عنها فجوات قد تصل الى عدة امتار فى قطرها وعمقها.

نقل المجارى المائية للرسوبيات

تعتبر مجارى المياه من أهم عوامل التعرية، ليس فقط

لمقدرتها على قطع قنواتها، ولكن ايضا لفاعليتها فى نقل كميات مأهولة من الرسوبيات الناتجة عن عملية التجوية. وبالرغم من أن عملية تعرية قناة المجرى تساهم بقدر كبير فى حمولة مجارى المياه، الا ان معظم هذه المواد مصدرها عملية التجوية. فالتجوية تدفع بكميات كبيرة من المواد الى المجرى بواسطة الاندفاع فى صفائح وكذلك بفعل تبدد الكتل والمياه الباطنية.

وتنقل الانهار حمولتها بثلاث طرق: (1) كمحلول (حمولة مذابة) و (2) معلق (حمولة معلقة) و (3) على قاع القناة (حمولة القاع).

وسبق أن ذكرنا ان بعض حمولة المجرى المائى المذابة تتكون بالاذابة المباشرة لصخور قناته، الا ان جلّها تأتى به المياه الباطنية. وعند بداية تخلل الماء للسطح يذيب بعض مكونات التربة ثم يضيف اليها مواد معدنية اخرى بتغلغله داخل الشقوق وخلال الفراغات المسامية، حيث غالبا ما يأخذ طريقه بعد ذلك الى مجارى المياه.

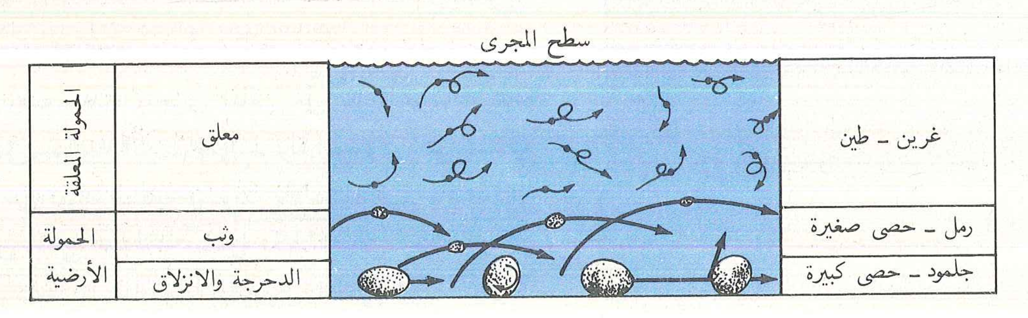
وبالرغم من أهمية سرعة الدفق لنقل الجزيئات الصلبة فانها ليست ذات اهمية بالنسبة للحمولة المذابة حيث ان الماء يعمل على نقل هذه الكمية بغض النظر عن سرعة حركته. وتبدأ عملية الترسيب فقط عند تغيّر تركيب الماء الكيميائى.

وتتباين كمية المواد المنقولة كحمولة مذابة من مجرى الى آخر بناء على معطيات تشمل المناخ وجيولوجية المنطقة.

ويعبر عن هذه الكمية بوحدة اجزاء المادة المذابة بمليون وحدة من الماء (جزء فى المليون). وقد تصل هذه الكمية ببعض الانهار الى 1000 جزء فى المليون. الا ان معدل الكمية المذابة لأنهار العالم تتراوح بين 115 و 120 جزء فى المليون. وتدفع مجارى مياه العالم الى المحيطات بحوالى 4 بليون طن مترى من المواد كحمولة مذابة.

ومعظم المجارى المائية (ولكن ليس جميعها) تحمل جل حمولتها معلقة (شكل 9 ـ 13). وبالتأكيد فان تعكير مياه المجارى الناتج عن هذه الحمولة واضح لكل ذى عينين. وفى العادة تكون الحمولة المعلقة من الرمال الدقيقة والطين والغرين، غير انه فى حالة الفيضانات قد تشمل محتويات اكبر حجما حيث تزيد نسبة الحمولة المعلقة بشكل ملحوظ. فنهر هوانج هو الصينى (النهر الاصفر) قد قدرت حمولته اثناء الفيضانات بما يساوى وزن المياه الحاملة له. وتوصف مثل هذه الانهار بأنها غليظة القوام عند الشراب ورقيقة القوام عند الزراعة.

ويتحكم فى كمية مواد الحمل المعلق عاملان: سرعة حركة الماء وسرعة ترسب حبيبات هذا الحمل. وتعرف سرعة الترسب بالسرعة التى تغوص بها الجزيئات فى سائل راكد. وكلما زاد الحجم كلما زادت سرعة الترسب. وبالاضافة الى الحجم فان للشكل وللثقل النوعى للجزيئات تأثيرا على سرعة ترسبها. فالجزيئات المفلطحة تترسب بسرعة اقل من الجزيئات الكروية الشكل والأقل منها كثافة. وكلما بقيت



شكل 9 ـ 13
نقل حمولة المجرى المائى.

لمقدرتها على قطع قنواتها، ولكن ايضا لفاعليتها فى نقل كميات مأهولة من الرسوبيات الناتجة عن عملية التجوية. وبالرغم من أن عملية تعرية قناة المجرى تساهم بقدر كبير فى حمولة مجارى المياه، الا ان معظم هذه المواد مصدرها عملية التجوية. فالتجوية تدفع بكميات كبيرة من المواد الى المجرى بواسطة الاندفاع فى صفائح وكذلك بفعل تبدد الكتل والمياه الباطنية.

وتنقل الانهار حمولتها بثلاث طرق: (1) كمحلول (حمولة مذابة) و(2) معلق (حمولة معلقة) و(3) على قاع القناة (حمولة القاع).

وسبق أن ذكرنا ان بعض حمولة المجرى المائى المذابة تتكون بالاذابة المباشرة لصخور قناته، الا ان جلّها تأتى به المياه الباطنية. وعند بداية تخلل الماء للسطح يذيب بعض مكونات التربة ثم يضيف اليها مواد معدنية اخرى بتغلغله داخل الشقوق وخلال الفراغات المسامية، حيث غالبا ما يأخذ طريقه بعد ذلك الى مجارى المياه.

وبالرغم من أهمية سرعة الدفق لنقل الجزيئات الصلبة فانها ليست ذات اهمية بالنسبة للحمولة المذابة حيث ان الماء يعمل على نقل هذه الكمية بغض النظر عن سرعة حركته. وتبدأ عملية الترسيب فقط عند تغيّر تركيب الماء الكيميائى.

وتتباين كمية المواد المنقولة كحمولة مذابة من مجرى الى آخر بناء على معطيات تشمل المناخ وجيولوجية المنطقة.

ويعبر عن هذه الكمية بوحدة اجزاء المادة المذابة بمليون وحدة من الماء (جزء فى المليون). وقد تصل هذه الكمية ببعض الانهار الى 1000 جزء فى المليون. الا ان معدل الكمية المذابة لأنهار العالم تتراوح بين 115 و120 جزء فى المليون. وتدفع مجارى مياه العالم الى المحيطات بحوالى 4 بليون طن مترى من المواد كحمولة مذابة.

ومعظم المجارى المائية (ولكن ليس جميعها) تحمل جل حمولتها معلقة (شكل 9 ـ 13). وبالتأكيد فان تعكير مياه المجارى الناتج عن هذه الحمولة واضح لكل ذى عينين. وفى العادة تكون الحمولة المعلقة من الرمال الدقيقة والطين والغرين، غير انه فى حالة الفيضانات قد تشمل محتويات اكبر حجما حيث تزيد نسبة الحمولة المعلقة بشكل ملحوظ. فنهر هوانج هو الصينى (النهر الاصفر) قد قدرت حمولته اثناء الفيضانات بما يساوى وزن المياه الحاملة له. وتوصف مثل هذه الانهار بأنها غليظة القوام عند الشراب ورقيقة القوام عند الزراعة.

ويتحكم فى كمية مواد الحمل المعلق عاملان: سرعة حركة الماء وسرعة ترسب حبيبات هذا الحمل. وتعرف سرعة الترسب بالسرعة التى تغوص بها الجزيئات فى سائل راكد. وكلما زاد الحجم كلما زادت سرعة الترسب. وبالاضافة الى الحجم فان للشكل وللثقل النوعى للجزيئات تأثيرا على سرعة ترسبها. فالجزيئات المفلطحة تترسب بسرعة اقل من الجزيئات الكروية الشكل والأقل منها كثافة. وكلما بقيت

شكل 9 ـ 13

نقل حمولة المجرى المائى.

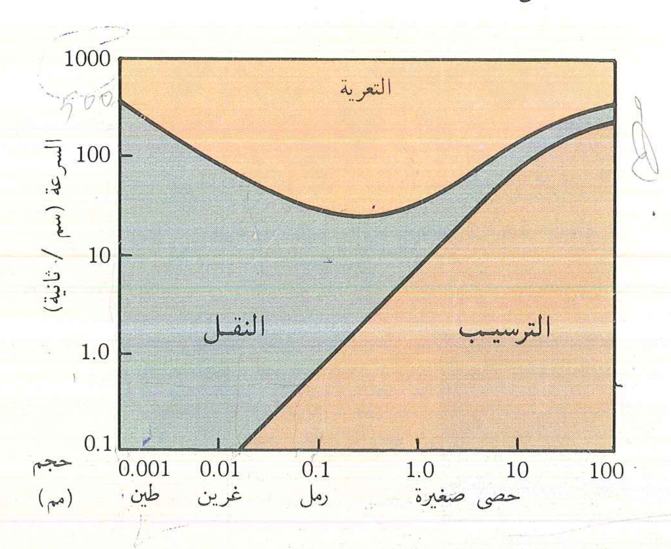
سرعة تدفق المجرى المائى اكبر من سرعة الترسب، فان الماء يعمل على نقل المحتويات العالقة.

ويتكون جزء من حمولة المجرى المائى من مواد صلبة ذات احجام لا يقدر على حملها معلقة. وتتحرك هذه المواد على القاع مكونة الحمولة الأرضية. وتعتبر الحمولة الأرضية ذات أهمية كبيرة بالنسبة لمقدرة المجرى المائى على تعرية قناته. وتتحرك حمولة القاع دحرجة أو تزحلقا او بالوثب (شكل 9 ـ 13). ويحدث الوثب بدفع الجزيئات الى اعلى نتيجة لتصادمها، أو بواسطة التيارات المائية، ومن ثمَّ تحمل الى مسافة قصيرة لتشدها الجاذبية مرة اخرى الى القاع. اما الأجزاء الكبيرة غير القادرة على الوثب فانها تتدحرج أو تنزلق على القاع وذلك بناء على شكلها.

وتختلف الحمولة الارضية على الحمولتين المعلقة والمذابة فى عدم حركتها الدائمة، حيث انها تغادر مكان تواجدها فقط عند توفر قوة الدفع الكافية لذلك. وفى بعض المجارى المائية تمثل الحمولة الارضية 50 فى المائة من الحمولة الكلية، غير انها عادة لا تتعدى ما قيمته 10 فى المائة من الحمولة الكلية. فمثلا يقوم نهر المسيسبى بنقل حوالى 750 مليون طن من المواد سنويا الى خليج المكسيك. وتقدر الحمولة المعلقة بحوالى 500 مليون طن، و 200 مليون طن كحمولة مذابة، بينما تمثل الخمسون مليون طن الباقية حمولة القاع. وجدير بالملاحظة انه يصعب قياس حمولة القاع بالمجارى المائية، وذلك لصعوبة الوصول اليها. بالاضافة الى انها اكثر حركة اثناء الفيضانات، حيث تزيد صعوبة قياسها. وعليه يجب النظر الى ارقام تقديرات كمياتها بحذر شديد.

وتوصف قدرة المجرى المائى على نقل الجزيئات عادة بناء على معيارين اثنين. اولهما الحمولة القصوى التى يستطيع نقلها من المواد الصلبة وتعرف بالاستيعاب. واستيعاب المجرى المائى له علاقة مباشرة بكمية الدفق، حيث انه كلما زادت كمية الماء المندفعة بالمجرى المائى زاد استيعابه. والمعيار الثانى هو كفاءة المجرى المائى. وهى تقاس بأقصى حجم من الفتات الصخرى يمكنه نقله. وتحدد سرعة المجرى كفاءته، حيث انه كلما زادت قوة الدفق كلما زادت كفاءة المجرى على نقل حمولته المعلقة. وعموما فان كفاءة المجرى المائى تزيد بحوالى مربع سرعته. وعليه اذا زادت سرعة المجرى الى الضعف فان كفاءته تزيد بمقدار اربعة اضعاف. واذا زادت السرعة بثلاثة اضعاف فان الكفاءة تزيد بمقدار تسعة اضعاف. وبناء عليه فان القطعة الصخرية الكبيرة عند قاع المجرى والتى قد يعتقد ان المجرى غير قادر على تحريكها يمكنه نقلها اثناء الفيضانات حيث تزداد سرعته.

ويوضح الشكل (9 ـ 14) تأثير سرعة المجرى المائى على التعرية والنقل والترسيب. ويبين المنحنى العلوى السرعة اللازمة لرفع احجام معينة. لاحظ ان السرعة اللازمة لرفع جزيئات بحجم الطين اكثر من تلك التى تلزم لتحريك حبيبات بحجم الرمل. ويرجع ذلك مبدئيا الى قوة التماسك التى تسبب فى التصاق جزيئات الطين على بعضها البعض. غير أنه اذا ما تم للماء تحريك هذه الجزيئات، فانها تبقى معلقة مدة طويلة حتى فى المياه البطيئة الحركة. وبالعكس من ذلك فان الجزيئات الاكبر حجما تبقى متحركة فى مدى سرعة أقل.



شكل 9 ـ 14

علاقة سرعة المجرى بالتعرية والنقل والترسيب لاحجام مختلفة.

والآن قد تم نسبيا توضيح السبب فى زيادة معدل التعرية ونقل الرسوبيات اثناء الفيضانات. فلا يقتصر تأثير الزيادة فى الدفق على زيادة مقدرة المجرى المائى. بل تزيد ايضا فى سرعة حركته. وبزيادة سرعة الحركة يزيد تعكر الماء، وبالتالى حجم الجزيئات المتحركة. وقد يستطيع المجرى المائى تعرية ونقل كمية من الرسوبيات خلال بضعة أيام أو حتى ساعات من فيضانه تساوى ما يستطيع نفس المجرى تعريته ونقله خلال شهور من حركته العادية.

تراكم الرسوبيات بفعل المجارى المائية

تتناقص كفاءة المجرى المائى بتناقص سرعته ويوضح المنحنى السفلى بالشكل (9 ـ 14)، أن تناقص السرعة ينتج عن ترسب الجزيئات بناء على حجمها. وبانخفاض تدفق الماء عن سرعة ترسب حجم معين من الجزيئات يسبب فى بدء عملية ترسبها. وبالتالى فان المجرى المائى يقوم بفصل الاحجام المختلفة عن بعضها. وتعرف هذه الظاهرة بعملية **الفرز** وهى تفسر ترسب الجزيئات المتقاربة فى الحجم مع بعضها.

وتسمى الرسوبيات ذات الفرز الجيد التى عادة ما تترسب بواسطة المجارى المائية**بالركام**. ويكوّن الركام الكثير من المظاهر الرسوبية، حيث يوجد بعضها داخل قناة المجرى أو بمحاذاتها أو عند المصب.

رسوبيات القناة

اثناء نقل النهر لحمولته الى البحر قد يقوم بترسيب جزء منها داخل قناته. وعادة ما تتكون هذه الرسوبيات من الرمل والحصى الصغيرة، اى الأجزاء الكبيرة الحجم نسبيا من حمولته. وتسمى هذه الرسوبيات **بالعقبات**. وهى ظواهر رسوبية مؤقتة كثيرا ما تنقل محتوياتها فيما بعد أسفل النهر حيث تنتهى فى معظم الاحيان بالمحيطات.

ويمكن ان تتكون عقبات الرمل والحصى الصغيرة تحت ظروف عديدة. فمثلا تكثر العقبات عند ثنيات المجرى، حيث تزيد السرعة عند حافة المنحنى الخارجية مما يزيد من معدل التعرية بها وعلى العكس تنقص السرعة على الضفة المقابلة مما يسمح بترسيب جزء من حمولة المجرى. وحيث ان هذا النوع من الرسوبيات يقع عند ما يشبه اللسان الداخلى للثنية فانها تسمى **رسوبيات اللسان**. وقد يكون من الأنسب وصفها بالتراكمات الهلالية من الرمال والحصى الصغيرة.

وقد يقوم المجرى المائى بترسيب المواد على قاع قناته، مما يسبب فى اختناقها وبالتالى تفرعه الى عدة مسارات، مما ينتج عنه شبكة معقدة من القنوات المتفرعة والمتلاحمة بين العقبات. وحيث أن لمثل هذا المجرى مظهر الجدائل فانه يسمى **المجرى المجدول** (شكل 9 ـ 15). وتحدث مثل هذه الظاهرة عندما تزيد الحمولة على قدرة المجرى. فمثلا عند التحام رافد شديد الانحدار ومياهه عكرة بمجرى رئيسى، فقد يقوم بترسيب حمولته الصخرية الأرضية عند نقطة الالتحام. وقد تقوم الأمطار الغزيرة بالدفع بكميات كبيرة من المواد بمنطقة تفتقر الى غطاء نباتى داخل المجرى، او عند نهاية مجلد، حيث تقوم مجارى المياه الناتجة عن الذوبان بدفع رسوبيات الجليد الى المجرى الرئيسى. ويتكون كذلك المجرى المجدول عند التناقص المفاجىء فى الممال، أو عند نقص كمية الدفق التى قد تكون نتيجة لتناقص كمية الامطار او لخروج المجرى من منطقة ممطرة الى اخرى جافة. ويترتب عن الحالة الأخيرة فقدان كمية من الماء عن طريق البخر وتسرب كمية اخرى خلال القناة مما يؤثر فى كمية الدفق.

رسوبيات سهل الفيضان

وكما تدل التسمية فان **السهل الفيضانى** هو جزء الوادى الذى غمرته المياه اثناء الفيضانات. وعموما فان معظم المجارى المائية لها سهول فيضانية يصل عرض بعضها الى عدة كيلومترات، فيما لا يتعدى البعض الآخر البضع امتار. واذا ما تفحصنا الركام الذى يغطى السهول

والآن قد تم نسبيا توضيح السبب فى زيادة معدل التعرية ونقل الرسوبيات اثناء الفيضانات. فلا يقتصر تأثير الزيادة فى الدفق على زيادة مقدرة المجرى المائى. بل تزيد ايضا فى سرعة حركته. وبزيادة سرعة الحركة يزيد تعكر الماء، وبالتالى حجم الجزيئات المتحركة. وقد يستطيع المجرى المائى تعرية ونقل كمية من الرسوبيات خلال بضعة أيام أو حتى ساعات من فيضانه تساوى ما يستطيع نفس المجرى تعريته ونقله خلال شهور من حركته العادية.

تراكم الرسوبيات بفعل المجارى المائية

تتناقص كفاءة المجرى المائى بتناقص سرعته ويوضح المنحنى السفلى بالشكل (9 ـ 14)، أن تناقص السرعة ينتج عن ترسب الجزيئات بناء على حجمها. وبانخفاض تدفق الماء عن سرعة ترسب حجم معين من الجزيئات يسبب فى بدء عملية ترسبها. وبالتالى فان المجرى المائى يقوم بفصل الاحجام المختلفة عن بعضها. وتعرف هذه الظاهرة بعملية **الفرز** وهى تفسر ترسب الجزيئات المتقاربة فى الحجم مع بعضها.

وتسمى الرسوبيات ذات الفرز الجيد التى عادة ما تترسب بواسطة المجارى المائية**بالركام**. ويكوّن الركام الكثير من المظاهر الرسوبية، حيث يوجد بعضها داخل قناة المجرى أو بمحاذاتها أو عند المصب.

رسوبيات القناة

اثناء نقل النهر لحمولته الى البحر قد يقوم بترسيب جزء منها داخل قناته. وعادة ما تتكون هذه الرسوبيات من الرمل والحصى الصغيرة، اى الأجزاء الكبيرة الحجم نسبيا من حمولته. وتسمى هذه الرسوبيات **بالعقبات**. وهى ظواهر رسوبية مؤقتة كثيرا ما تنقل محتوياتها فيما بعد أسفل النهر حيث تنتهى فى معظم الاحيان بالمحيطات.

ويمكن ان تتكون عقبات الرمل والحصى الصغيرة تحت ظروف عديدة. فمثلا تكثر العقبات عند ثنيات المجرى، حيث تزيد السرعة عند حافة المنحنى الخارجية مما يزيد من معدل التعرية بها وعلى العكس تنقص السرعة على الضفة، المقابلة مما يسمح بترسيب جزء من حمولة المجرى. وحيث ان هذا النوع من الرسوبيات يقع عند ما يشبه اللسان الداخلى للثنية فانها تسمى **رسوبيات اللسان**. وقد يكون من الأنسب وصفها بالتراكمات الهلالية من الرمال والحصى الصغيرة.

وقد يقوم المجرى المائى بترسيب المواد على قاع قناته، مما يسبب فى اختناقها وبالتالى تفرعه الى عدة مسارات، مما ينتج عنه شبكة معقدة من القنوات المتفرعة والمتلاحمة بين العقبات. وحيث أن لمثل هذا المجرى مظهر الجدائل فانه يسمى **المجرى المجدول** (شكل 9 ـ 15). وتحدث مثل هذه الظاهرة عندما تزيد الحمولة على قدرة المجرى. فمثلا عند التحام رافد شديد الانحدار ومياهه عكرة بمجرى رئيسى، فقد يقوم بترسيب حمولته الصخرية الأرضية عند نقطة الالتحام. وقد تقوم الأمطار الغزيرة بالدفع بكميات كبيرة من المواد بمنطقة تفتقر الى غطاء نباتى داخل المجرى، او عند نهاية مجلد، حيث تقوم مجارى المياه الناتجة عن الذوبان بدفع رسوبيات الجليد الى المجرى الرئيسى. ويتكون كذلك المجرى المجدول عند التناقص المفاجىء فى المهال، أو عند نقص كمية الدفق التى قد تكون نتيجة لتناقص كمية الامطار او لخروج المجرى من منطقة ممطرة الى اخرى جافة. ويترتب عن الحالة الأخيرة فقدان كمية من الماء عن طريق البخر وتسرب كمية اخرى خلال القناة مما يؤثر فى كمية الدفق.



رسوبيات سهل الفيضان

وكما تدل التسمية فان **السهل الفيضانى** هو جزء الوادى الذى غمرته المياه اثناء الفيضانات. وعموما فان معظم المجارى المائية لها سهول فيضانية يصل عرض بعضها الى عدة كيلومترات، فيما لا يتعدى البعض الآخر البضع امتار. واذا ما تفحصنا الركام الذى يغطى السهول

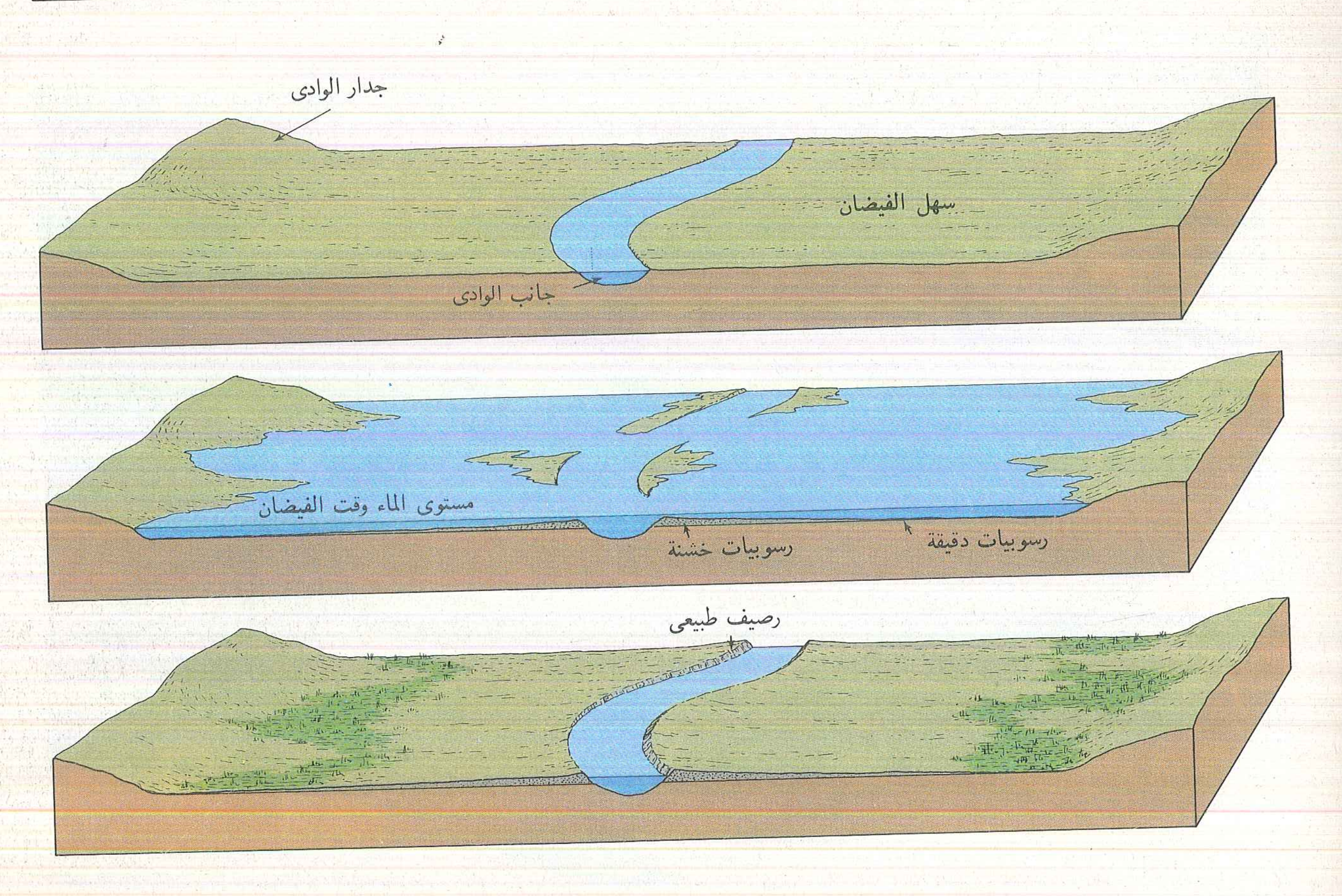


شكل 9 ـ 15
مجرى مجدول يختنق بالرسوبيات قرب حافة مجلد فى طور الذوبان.

الفيضانية، لوجدنا ان بعضه يتكون من الرمال الخشنة والحصى الصغيرة، التى ترسبت اصلا كرسوبيات السنة بواسطة مجارى مائية متعرجة مغيرة فى مساراتها جانبيا. ويتكون البعض الآخر من أغطية السهول الفيضانية من الرمال الدقيقة والغرين والطمى التى تنتشر فوق هذه السهول كلما غادرت المياه قناة المجرى اثناء الفيضانات.

وتبنى الانهار ذات الاحواض العريضة والمنبسطة ما يعرف **بالأرصفة الطبيعية** على موازاة القناة. ويتم بناء الأرصفة الطبيعية بتوالى الفيضانات على مدى عدة سنين.

وعند فيضان الماء فوق حواف مجراه، يتحرك الماء على السطح فى صفيحة عريضة مما ينقص من سرعته واضطرابه. ويتم هنا ترسب الاحجام الكبيرة على حواف القناة، اما باقى الرسوبيات القليلة فى كميتها والدقيقة فى حجم مكوناتها فيتم تراكمها فوق سطح الوادى. وينتج عن هذا التوزيع، غير المتساوى للرسوبيات، تكوين ممال طفيف للارصفة الطبيعية (شكل 9 ـ 16). وعلى سبيل المثال ترتفع ارصفة نهر المسيسبى الطبيعية بمقدار 6 امتار على مستوى الحوض. ولانحدار الارصفة الطبيعية الى الخارج، فان الماء



شكل 9 ـ 16

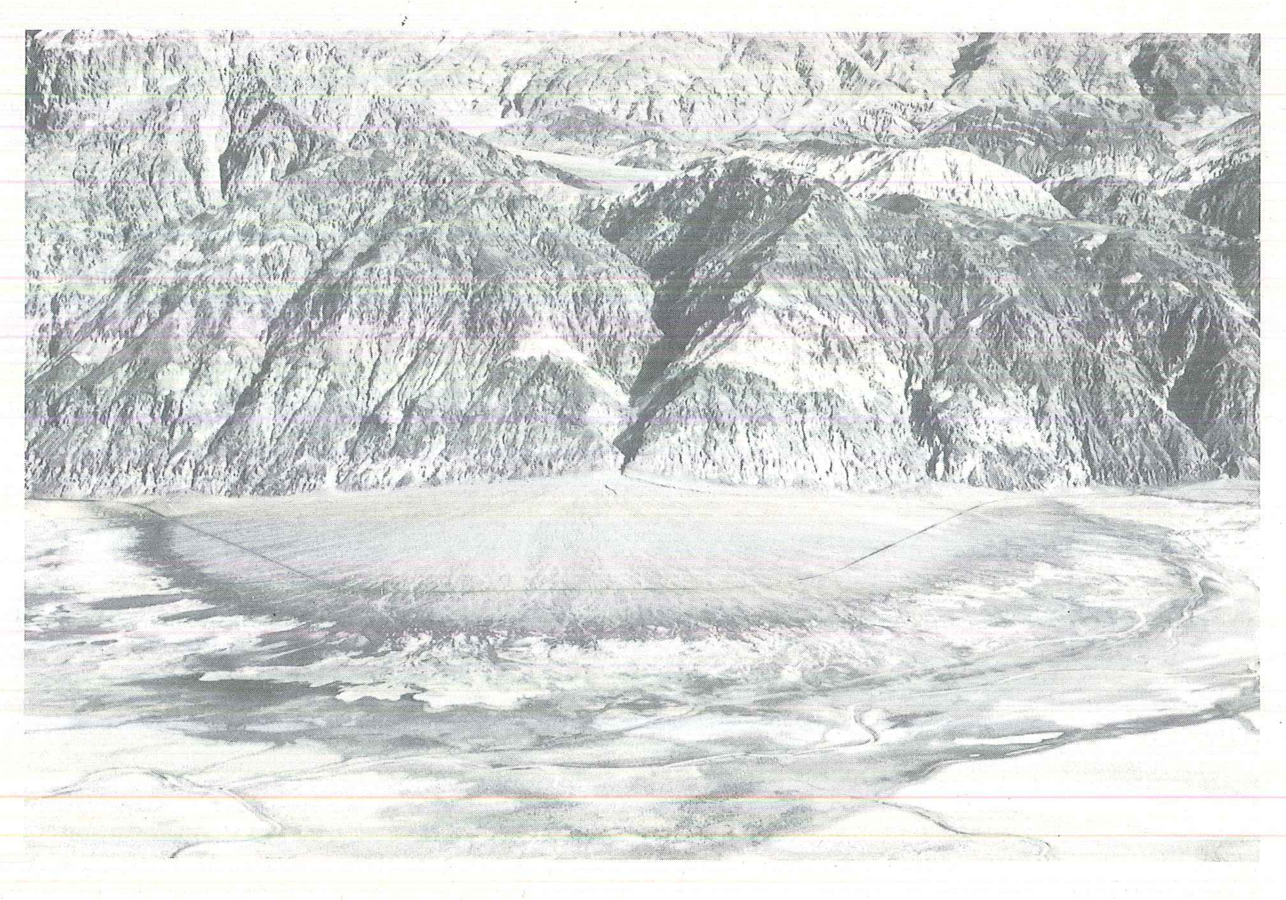
تكون الارصفة الطبيعية. بعد اعادة الفيض قد يقوم المجرى ببناء أرصفة ذات ميل طفيف.

الفائض لا يجد طريقه الى النهر ثانية بل يكوّن ما يسمى **بالمستنقع الخلفى**. وقد يضطر احد الروافد الى محاذاة الرصيف الطبيعى فى مسار موازٍ لمسار النهر قبل الالتحام به وهذا يسمى **برافد اليازو** وذلك كناية الى نهر اليازو الذى يجرى بمحاذاة نهر المسيسبى لمسافة 300 كيلومتر.

وقد يتم بناء ارصفة صناعية محاولة للتحكم فى الفيضانات. وهذه سهلة التميز من الارصفة الطبيعية لشدة انحدارها. وعندما تحجز الارصفة المياه داخل المجرى فان المياه تقوم بترسيب حمولتها داخل القناة التى كانت ستترسب على سهل الفيضان عند تناقص كمية تدفقه. وبهذا يتم بناء القناة الى اعلى مما يلزم كمية اقل من الماء لتفيض فوق الارصفة الاصلية. وبهذا يلزم رفع مستوى الارصفة ثانية لتفادى الفيضانات. ومثال ذلك ارصفة نهر المسيسبى التى تم رفعها مرات عدة. ولهذا فان بناء الارصفة الصناعية لا يعتبر حلا نهائيا لمشكلة الفيضانات. ولضمان فاعليتها يلزم زيادة ارتفاعها من آن لآخر، وهى عملية لا يمكن استمرارها الى ما لا نهاية.

الدلتا والمراوح الركامية

تمثل المراوح الركامية والدلتا اثنان من اهم المعالم المتكونة من الركام وهنا كثيرا ما يتشابهان فى الشكل، غير أن مكوناتها تترسب لنفس السبب، وهو الفقدان المفاجىء



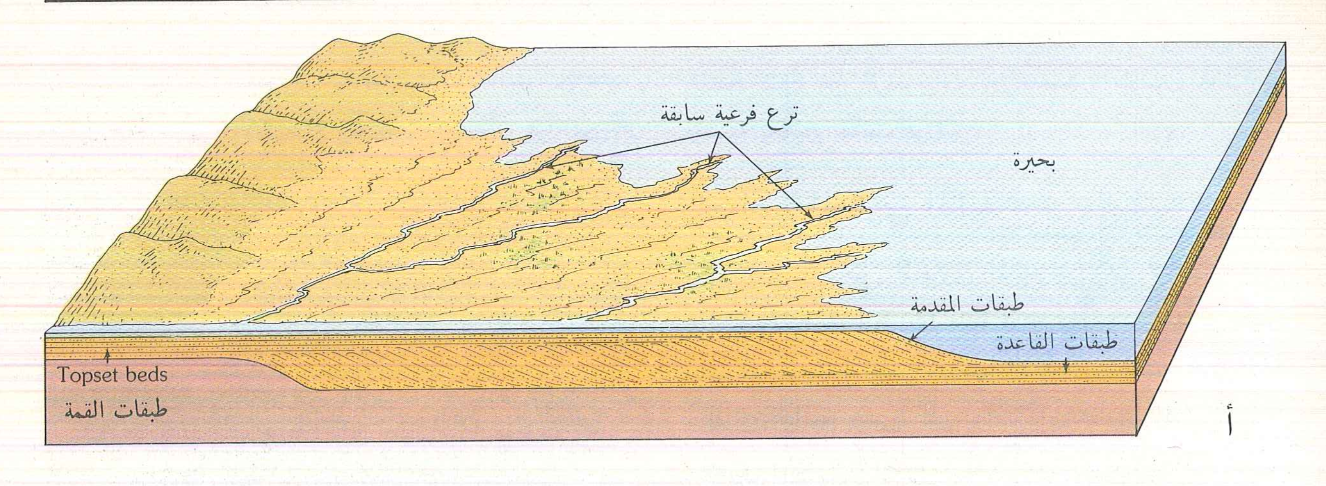
شكل 9 ـ 17

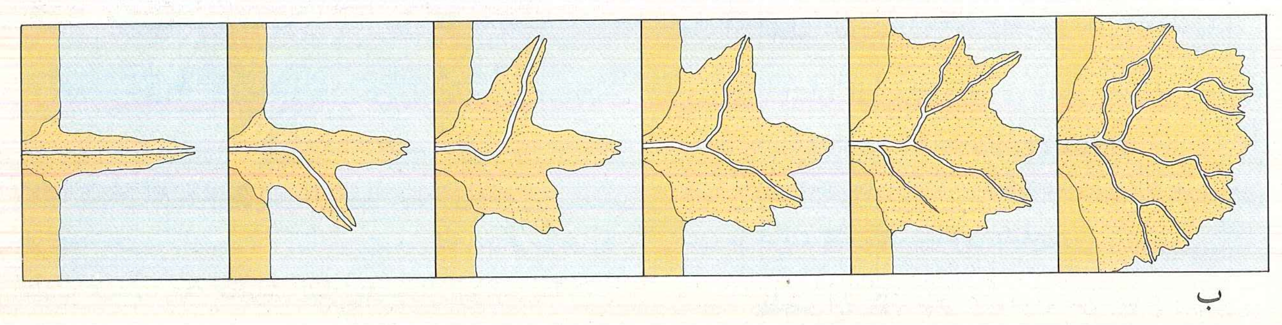
مروحة ركامية بوادى الموت بكاليفورنيا. تتكون هذه الظواهر عندما يتغير ممال المجرى فجأة.

لكفاءة المجرى. وبالرغم من تشابههما فى هذا الشأن الا انهما ظاهرتان لكل منهما مميزاته. فالمراوح الركامية تتجمع على اليابسة، بينما تترسب الدلتا فى جسم مائى، بالاضافة الى ان الدلتا اكبر انبساطا ولا تكاد تبرز فوق سطح مستوى منسوب المحيطات او البحيرات. وعلى العكس من ذلك فان المراوح الركامية تكون شديدة الانحدار.

وتتكون عادة المراوح الركامية: عند مغادرة مجرى مائى ضيق ذى ممال عال بمنطقة جبلية فجأة الى حوض او سهل عريض. وتتكون المراوح الركامية كرد فعل للتغيّر المفاجىء فى الممال المتزامن مع التغير فى حجم القناة الضيقة فى المنطقة الجبلية الى مجرى مفتوح فوق منحدر سهل. ويسبب النقص المفاجىء فى سرعة المجرى الى تراكم الرسوبيات فى شكل مخروطى مميز على هيئة مروحة. ويوضح الشكل (9 ـ 17) سطح المروحة المائل الى الخارج فى قوس عريض وقمة عند نهاية المجرى الشديد الانحدار. وعادة ما تتراكم الرسوبيات الكبيرة الحجم عند قمة المروحة، بينما تتجمع الرسوبيات الاقل حجما عند القاعدة. وكما سبق وان ذكرنا فان المجارى الشديدة الانحدار مواقع نموذجية للدفق الطينى. وعليه فاننا نتوقع وجود مثل هذه الرسوبيات متداخلة مع رسوبيات المراوح الركامية فى المناطق الجافة.

أما الدلتا فتتكون عند دخول مجرى الماء مياه المحيط أو البحيرات الهادئة نسبيا. وهنا يضمحل معدل تقدم المجرى



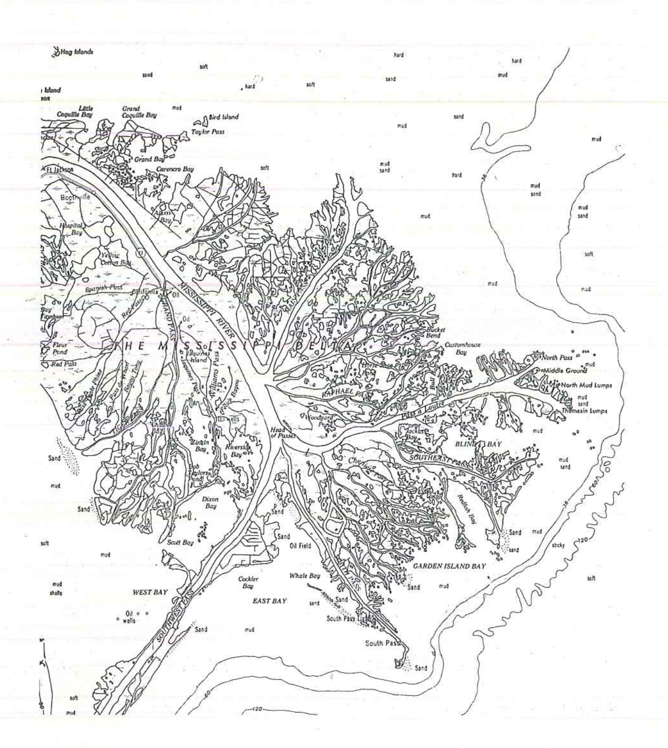


شكل 9 ـ 18

(أ) ـ تركيب الدلتا فى رسم تخطيطى مبسط (ب) ـ نمو دلتا بسيطة. كلما زاد المجرى فى قناته يبحث عن أقصر الطرق الى مستوى قاعدته تحت تأثير مماله المتناقص.

المائى وتترسب حمولته بحيث تتراكم الاحجام الغرينية والطينية بعيدا عن المصب فى طبقات افقية تقريبا، تسمى **طبقات القاعدة** (شكل 9 ـ 18 أ). وقبل تراكم طبقات القاعدة تبدأ **طبقات المقدمة** فى التكوّن. وهى تتكون من رسوبيات خشنة سرعان ما تترسب حال اندفاعها داخل الجسم المائى فى طبقات مائلة. وعادة ما يغطى رسوبيات طبقات المقدمة طبقات افقية رقيقة وناعمة تسمى **طبقات القمة** تتراكم اثناء الفيضانات. وبنمو الدلتا يتناقص ممال المجرى المائى مما يدفعه الى البحث عن طريق اقصر الى مستوى القاعدة وذلك كما هو موضح بالشكل (9 ـ 18 ب). وهو يبين كيف تتطور الدلتا البسيطة إلى الشكل المثلث للحرف الاغريقى دلتا (△) التى تحمل اسمها. ويلاحظ ان الكثير من الدلتات لا تأخذ هذا الشكل، حيث تعمل طبيعة الشواطىء وتشكيلاتها على اعطائها اشكال مختلفة. وبالاضافة الى ذلك فان انهار العالم الكبيرة تكونت بنهاياتها دلتات لا يشبه أى منها الرسم التخطيطى المبسط بالشكل (9 ـ 18 ب).

وللأنهار الكبيرة مثال نهر النيل والمسيسبى دلتا تغطى آلاف الكيلومترات المربعة. فقد بدأت مثلا دلتا نهر المسيسبى بالتكوين منذ ملايين السنين بالقرب من مدينة القاهرة الامريكية بولاية الينوى. ومنذ ذلك الوقت امتدت الدلتا الى الجنوب مسافة تقارب 1600 كيلومتر. وقد كانت تغطى مياه المحيط قبل اقل من 5000 سنة موقع مدينة نيواورلينز الحالى. ويوضح الشكل (9 ـ 19) دلتا على شكل قدم طائر تم بناءها خلال الخمسمائة سنة المنصرمة، وكذلك بعض القنوات المتشعّبة التى تتخللها وهى تعرف بالموزعات



شكل 9 ـ 19

دلتا نهر المسيسبى التى على شكل رِجْل طَائِر. خريطة طبوغرافية مقياس رسم 1:250,000. امتدت الدلتا تجاه البحر خلال 400 سنة الماضية حوالى 32 كيلومترا. لاحظ الترع الفرعية التى على شكل قنوات فوق الدلتا.

الفرعية. وتتميز دلتا نهر المسيسبى، مثل معظم باقى دلتات الانهار بتغيرّ القنوات خلالها، ولهذا تأثير معاكس للروافد. فبدل من ان تدفع الماء الى المجرى الرئيسى فان الموزعات تأخذ الماء فى مسارات مختلفة الى البحر.

وبالرغم من ان لكثير من الانهار الكبيرة دلتات، الا ان بعضها يفتقر الى هذه الظاهرة الترسيبية. وقد تعمل التيارات المائية والامواج على سرعة توزيع الرسوبيات،وبالتالى منع تكون دلتا بنهاية بعض المجارى المائية التى قد تحمل كميات رسوبية كبيرة. ومثال ذلك نهر كولومبيا. وفى بعض الاحيان يعزى عدم تكوّن الدلتا الى عدم توفر حمولة رسوبية كافية، مثل ما هو عليه الحال فى نهر سانت لورنس الذى لا يلتقط كثيرا من الرسوبيات بين مصدره ببحيرة اونتاريو ومصبه بخليج سانت لورنس.

أحواض المجارى المائية

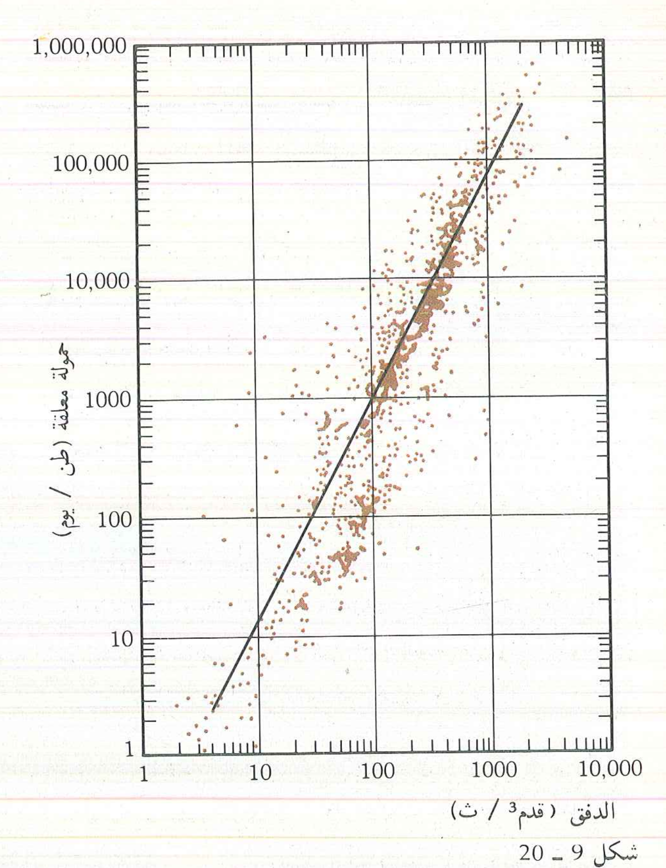
تعتبر أحواض المجارى المائية من أهم مميزات سطح الكرة الأرضية. ولكثرتها فاننا لا نعرف عددها الا فى بعض المناطق المحدودة التى شملتها الدراسة والبحث. فقبل نهاية القرن التاسع عشر، كان يعتقد بأن مجارى المياه تتكون لتمزّق القشرة الأرضية تاركة فراغات تجرى بها المياه. واليوم نعلم أن معظم مجارى المياه مسئولة عن حفر احواضها.

وأول إشارة الى علاقة مجارى المياه بحفر أحواضها، جاءت من الجيولوجى الانجليزى جون بليفير سنة 1802 تحت عنوان توضيحات للنظرية الهيتونية حول الأرض، حين كتب ما عرف بعد ذلك بقانون بليفير:

يظهر أن كل نهر يتكون من جذع رئيسى تغذيه عدة فروع. وكل منها يجرى فى حوض يتناسب وحجمه، وهى تكوّن فى مجموعها شبكة أحواض متصلة ببعضها فى عملية منتظمة،بحيث لا يتصل أى منها بالحوض الرئيسى عند نقطة شديدة الارتفاع أو الانخفاض عنه. ولا يتأتى ذلك الا اذا كانت الاحواض نتاج المياه التى تجرى بها.

ولم تقتصر ملاحظات بليفير على كونها صحيحة، بل انها صيغت بطريقة علمية جيدة. وتقسم احواض مجارى المياه الى نوعين ضيق على شكل حرف V اللاتينى وآخر عريض بقاع منبسط مع عدة اشكال انتقالية بينها.

ففى المناطق الجافة حيث يكون القطع العمودى سريعا والتجوية بطيئة، أو فى المناطق ذات الغطاء الصخرى الصلب، تتكون وديان ضيقة ولكنها قد لا تكون على شكل V ، بل تكون جوانبها عمودية تقريبا. ولمعظم الوديان حافتين اكثر عرضا من قاع القناة. ولا يحدث ذلك اذا اقتصر فعل التعرية بجانبى الوادى على مياهه الجارية به.



شكل 9 ـ 20
علاقة الحمولة المعلقة بكمية الدفق لنهر الباودر.

وتشارك التجوية والتدفق الصفحى وتبدد الكتل فى تشكيل جانبى الحوض. ومثال ذلك الشكل 9 ـ 20، الذى يوضح العلاقة بين الحمولة المعلقة وكمية الدفق على نقطة قياس على نهر الباوِدر بولاية وايومينج الامريكية. لاحظ أن كمية الحمولة المعلقة تزيد بزيادة الدفق. والزيادة هنا أسّية أى أنه اذا ما زاد الدفق عند نقطة القياس عشرة اضعاف فان الحمولة المعلقة تزيد بعامل 100 أو أكثر. فقد بينت القياسات والحسابات ان تعرية القناة اثناء زيادة الدفق، تساهم بقدر محدود فى الزيادة فى حمولة المجرى. وعليه فان الكثير من مكونات الحمولة الاضافية يتم جلبها بواسطة التدفق الصفحى وتبدد الكتل. ويبين الشكل V لقطاع الوادى ان عمل المجرى الرئيسى هو قطع مجراه عموديا الى مستوى القاعدة. واهم مظاهر مثل هذا المجرى ما يسمى بالمسرعات والشلالات شكل 9 ـ 21.

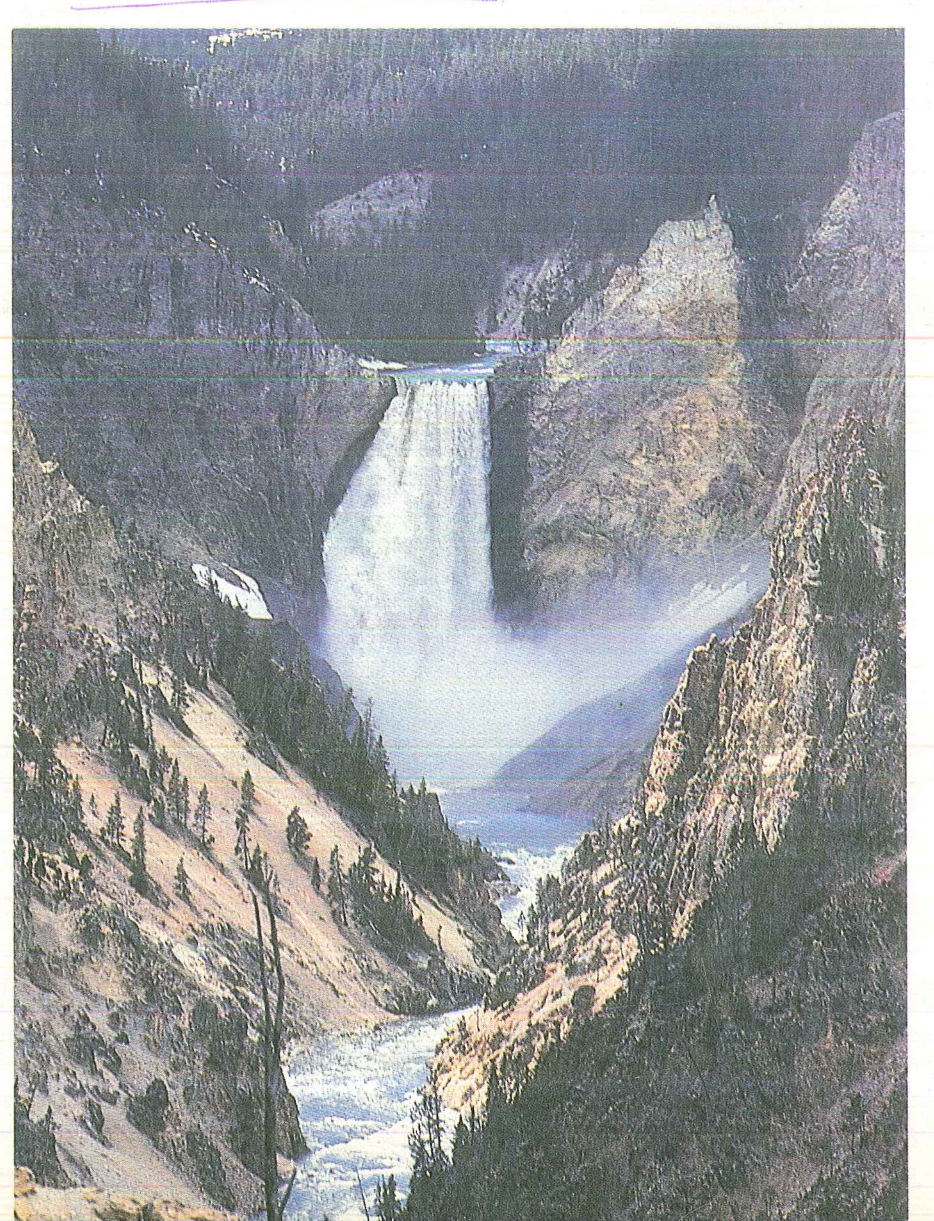
ويتكوّن كلاهما عند انخفاض مقدار القطاع الجانبى فجأة وذلك لاختلاف مقاومة التعرية لمكونات المجرى الصخرية. وتعمل الطبقات الصلبة على تكوين احد هذه المسرعات، لتعمل كمستوى قاعدة مؤقت، بينما يستمر النهر فى التعرية تجاه المصب. وعند تعرية النهر لهذه الطبقة تتم تسوية المجرى الى قطاع اكثر تناسقا. أما الشلالات فهى مواقع انحدار الماء فى وضع عمودى، مثل شلالات نياجارا (شكل 9 ـ 22 أ). وهنا تستند الشلالات على طبقة من الدولوميت الواقعة فوق طبقة من الصخر الطينى الاقل مقاومة من الطين (شكل 9 ـ 22 ب). ويعمل الماء المتساقط فوق الحافة على تعرية طبقة الصخر الطينية، مما يحدث خللا فى حافة طبقة الدولوميت وبالتالى كسرها. وبهذا يحتفظ الشلال بجرفه العمودى بينما يتراجع عن موقعه ببطء وباستمرار. وقد قدر تراجع شلالات نياجارا منذ تكونها بحوالى 11 كيلومترا.

وعند قرب وصول النهر الى مستوى القاعدة يكاد ان يصبح نهرا ممهدا، وبالتالى تنقص قدرته على التعرية العمودية، وعليه فان طاقته تتجه الى التعرية جانبيا. والسبب فى هذا التغيّر ليس مفهوما الى حد الآن. وينتج عن ذلك زيادة عرض النهر بالبدء فى القطع من أحد الجانبين ثم يتجه الى الجانب الآخر (شكل 9 ـ 23). وبهذه الطريقة يتكون قاع المجرى المسطح او ما يسمى بسهل الفيضان. وترجع هذه التسمية الى كون النهر يجرى فى قناته فيما عدى وقت الفيضانات، حيث يفيض على ضفتيه ويغمر سهل الفيضان.

وعند تعرية النهر جانبيا كما سبق وان شرحنا مكونا سهل الفيض يسمى هذا بسهل الفيض التآكلى. وقد يكون سهل الفيض ترسيبى، وذلك بالتغيّر فى ظروف النهر مثل مستوى القاعدة. ومثال ذلك سهل الفيض بنهر اليوسمايت

حيث تم تعميق مجراه 300 مترا على مستواه الأصلى. وبعد ذوبان الجليد اعاد النهر مستوى قاعدته الى ما كانت عليه بملء مجراه بالركام.

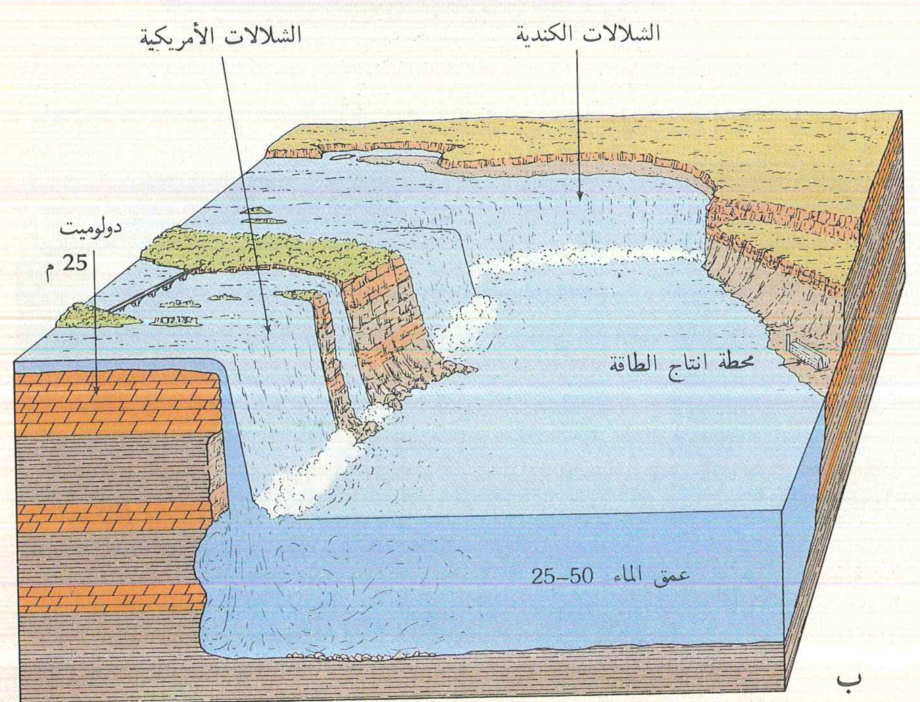
ويسير النهر المخترق لسهول الفيضانات سواء كانت تآكلية أو ترسيبية فى انحناءات تسمى **بالتعرجات**. وعند بداية تكون انحناء فى مجرى الوادى فانه يكبر فى الحجم، وذلك بتعرية الجانب الخارجى، حيث تبلغ السرعة والاضطراب اقصى مداها. وعادة ما يعمل الماء على حفر قاع الجانب الخارجى خاصة وقت الفيضانات مما يجعله شديد الميل، وبالتالى ينهال الى داخل القناة. وكثيرا ما يشار الى هذا الجانب **بضفة القطع** (شكل 9 ـ 24). وكثيرا ما ينقل مواد ضفة القطع المجرى لتتجمع كرسوبيات السنة عند نطاق انخفاض السرعة على الجانب الداخلى. وبناء عليه فان التعرّجات تغيّر مواقعها جانبيا مع المحافظة على نفس مساحة قطاعها العرضى عن طريق تعرية الجانب الخارجى للثنية والترسيب عند جانبها الداخلى (شكل 9 ـ 25). وتقف هذه العملية عند حد معين بناء على حجم المجرى المائى. فكلما كان المجرى كبيرا كلما زاد مقدار تعرجاته.



شكل 9 ـ 21

وادى على شكل حرف V اللاتينى بنهر البيلوستون. تدل المنحدرات والشلالات على أن النهر نشط فى عملية قطع قناته رأسيا.

أ



شكل 9 ـ 22

(أ) ـ شلالات نياجـرا . (ب) ـ يتساقط ماء النهر ويقوم بتعرية الطبقة الطينية من تحت صخور الدولوميت وبـذلك تنكسر طبقـات الدولـوميت التي تبقى بدون سند.

أ

موقع تعرية

موقع ترسيب

ب

سهل فيضان
متكامل التكوين

جـ

شكل 9 ـ 23

نهر يعرى سهل فيضانه.



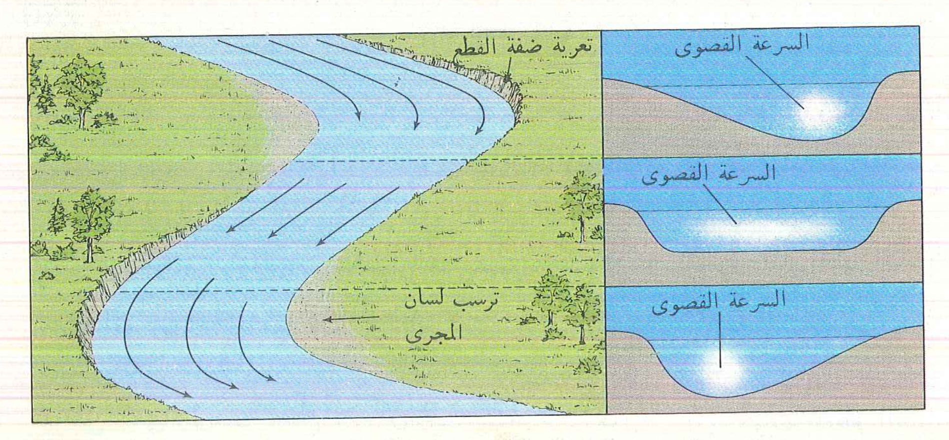
أ



ب

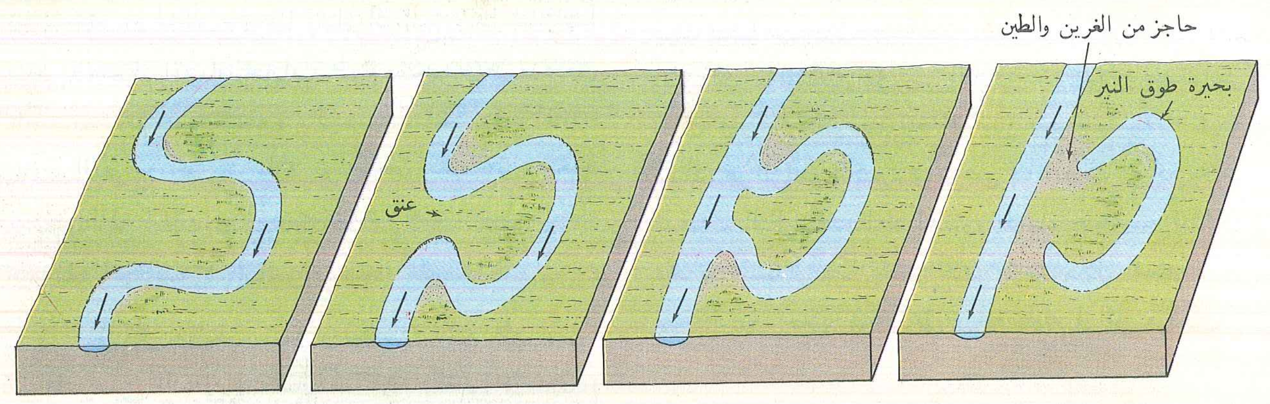
شكل 9 ـ 24

تعرية ضفة القطع بنهر نيووكم. (أ) ـ أى النار (يناير) 1965 . (ب) ـ المريخ (مارس) 1965.



شكل 9 ـ 25

الحركة الجانبية للمجرى المائى. يستطيع المجرى تغيير موقع مساره جانبيا بواسطة التعرية من الضفة الخارجية والترسيب عند الضفة الداخلية للتعرجات.



أ



ب

شكل 9 ـ 26

(أ) ـ تكون قناة القطع وبحيرة طوق النير. (ب) ـ منظر جوى لنهر هى المتعرج بألبيرتا والذى من مميزاته بحيرات طوق النير وندبات التعرج .

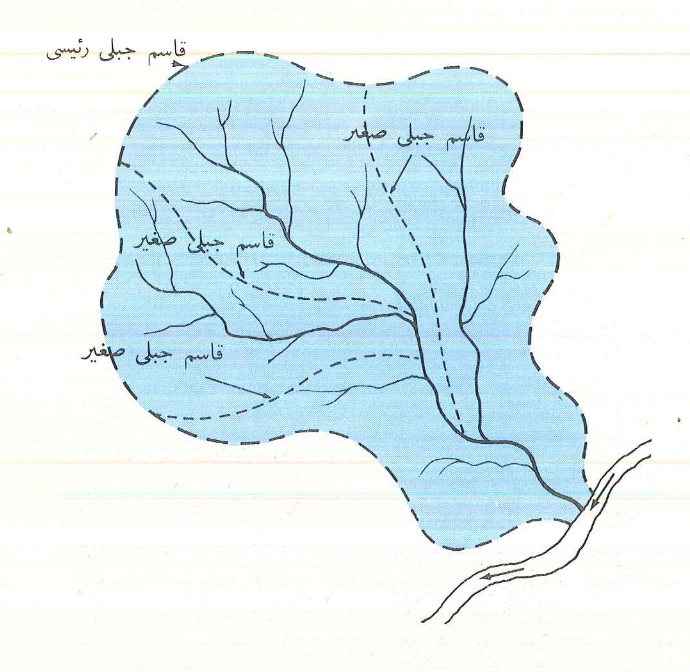
وبسبب انحدار القناة فان التعرية تكون اكثر تأثيرا عند ناحية التعرج السفلى منها عند الناحية المقابلة. وعليه فبالاضافة الى الحركة الجانبية فان هذه الثنيات تتحرك بموقعها الى الأمام. وفى بعض الاحيان قد يتسبب وصول التعرج الى جزء صلب من سهل الفيضان مما يسبب فى ابطاء تقدمه وبالتالى قد يلحق به التعرج التالى، وبالتدريج يضيق الفاصل بينهما الى ان ينقطع (شكل 9 ـ 26). وتسمى القناة الجديدة والقصيرة هنا بقناة **القطع** وكذا لشكلها تسمى الاجزاء المهملة**ببحيرات طوق النير**. وبعد مدة من الزمن يتم ردم هذه البحيرة بالرسوبيات ليتكون ما يعرف **بندب التعرج**. وقد عبر مارك توين حين كتب حول عملية تقصير النهر لمساره فى اسلوب ظريف تحت عنوان الحياة فوق نهر المسيسبى ما يلى:

> **خلال مائة وستة وسبعين سنة قام نهر المسيسبى السفلى بتقصير مساره مائتى واثنين واربعين ميلا اى بمعدل ميلٍ وثلث سنويا. وعليه فان من المنطقى ادراك ان طول نهر المسيسبى كان مليون وثلاثمائة الف ميل وذلك قبل مليون سنة مضت. وعلى هذا المنوال سيكون طول هذا النهر بعد سبعمائة سنة حوالى ميلا وثلث الميل. وبهذا ستلتحم شوارع مدينتى القاهرة ونيو اورلينز على مجراه. وعليه فان سحر العلم يكمن فى استثمار الحقائق البسيطة لاستنباط وقائع المستقبل.**

وبالرغم من ان المعلومات التى استعملها مارك توين هى غاية فى الدقة، فهو قد نسى أن نهر المسيسبى قد استحدث تعرجات عديدة مضيفا الى طوله. ومع الأخذ فى الاعتبار بناء الدلتا نجد أنه فى الحقيقة يزداد طولا وليس العكس.

ومن الطرق المستعملة للتحكم فى الفيضانات قطع قناة المجرى لتقويمها، والفكرة هنا فى تقصير المجرى ليزداد الميال وبالتالى تزداد السرعة. وبزيادة السرعة يمكن التخلص من الزيادة فى الدفق بسرعة أكبر. وقد تم تنفيذ 16 قناة قطع على نهر المسيسبى منذ سنة 1932 وذلك لزيادة كفاءة قناته وتفادى تهديد فيضانه. وقد نجحت هذه الطريقة فى تخفيض مستوى الماء بالنهر اثناء الفيضانات. وحيث أن قابلية النهر للتعرج ما زالت قائمة فان هناك صعوبة فى منع رجوعه الى سابق وضعه المتعرج.

وقنوات القطع الصناعية تزيد من سرعة النهر وقد تزيد ايضا من معدل تعرية قناته عند القاعدة والجانبين. ومن آثار ذلك ما حدث على نهر البلاك دوتر بولاية ميسورى حيث قصّرت قناته سنة 1910. ومن ضمن ما حدث نتيجة لذلك، هو الزيادة الكبيرة فى عرض قناته وذلك لزيادة سرعة تدفقه وبالتالى تهدم احد الجسور المنشأة عليه سنة 1930. وقد تم استبدال هذا الجسر ثلاث مرات خلال السبعة عشر سنة التالية، حيث عمل على زيادة طوله فى كل مرة.



شكل 9 ـ 27

حوض تصريف وقواسم جبلية. تفصل القواسم بين أحواض التصريف لكل مجرى مائى. كما توجد قواسم بين الرافد الصغير ولكنها غير موضحة.

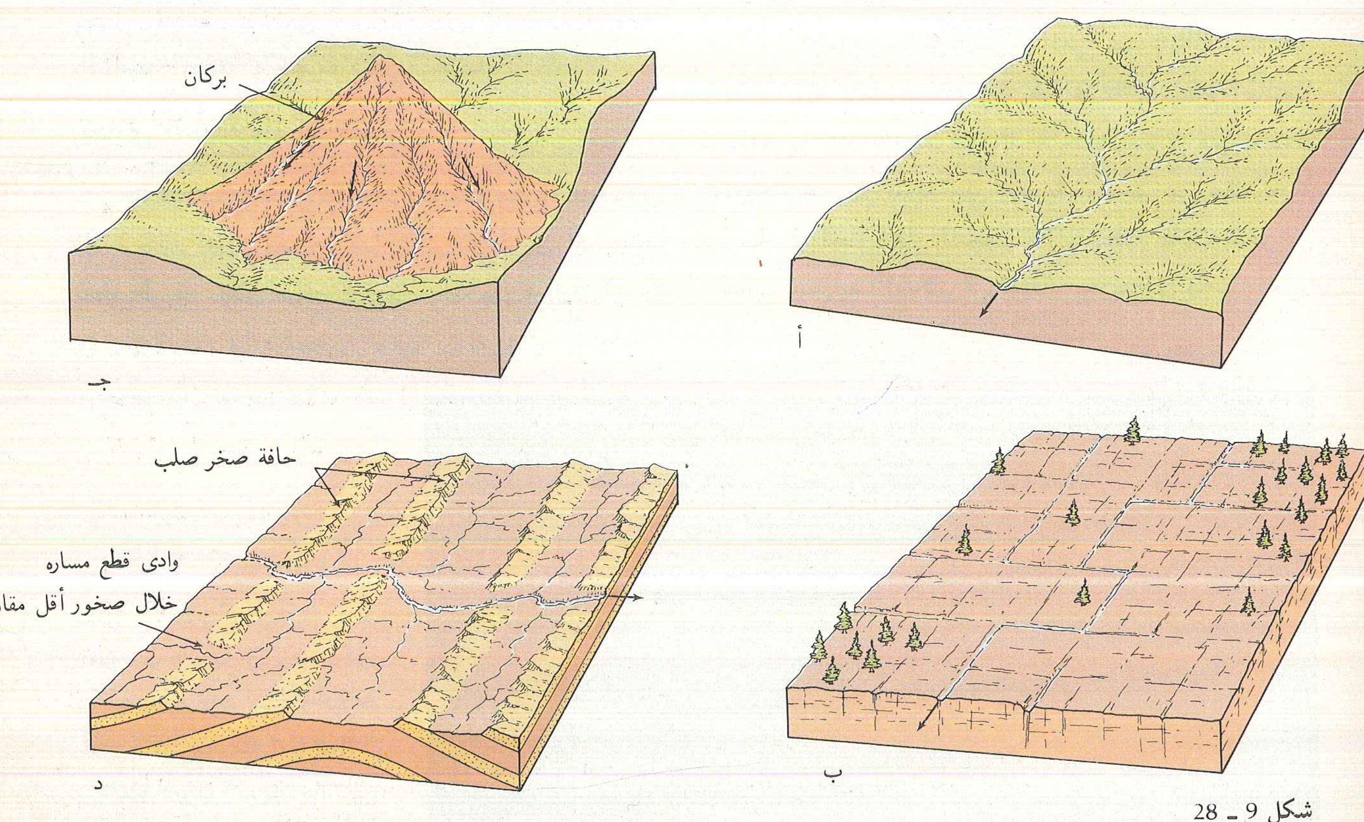
شبكات نظم الصرف

يعتبر مجرى المياه الواحد جزء صغير من نظام صرف اكبر منه بكثير. فكل نظام صرف يتكون من حوض الصرف، وهو يشمل المساحة التى تساهم فى جمع الماء للمجرى. ويفصل بين كل حوض صرف وآخر خط وهمى يسمى القاسم الجبلى (شكل 9 ـ 27). ويتراوح حجم هذا القاسم من مرتفع يفصل جدولين، الى القاسم الجبلى القارى، الذى يقسم القارات الى عدة احواض هائلة. وقد يفصل القاسم الجبلى نظامى صرف لرافدى نهر واحد عندها يكون هذان النظامان جزءاً من نظام واحد اكبر حجما.

نظام الصرف

تتكون نظم الصرف من شبكة متصلة من المجارى المائية التى تشكل فى مجموعها نظاماً معيناً للصرف. وتختلف نظم الصرف من مكان الى آخر حسب مكونات الصخور التى تخترقها او النمط التركيبى للصدوع والطيات. وبالطبع فان اكثر نظم الصرف انتشارا هو المتشجر (شكل 9 ـ 28 أ). ويتميز هذا النظام بروافد متفرعة وغير منتظمة من مجارى المياه التى تشبه فروع الأشجار النفضية. ويميز النظام المتشجر المناطق المتجانسة فى تكوين صخورها، مثال الطبقات الافقية أو كتلة من الصخور النارية. وحيث أن مقاومة الصخور للتعرية متجانسة فانها لن تتحكم فى نظام الصرف بل يكون التأثير أساسا ناتجا عن اتجاه ميل سطح الأرض.

ويوضح الشكل (9 ـ 28 ب) نظام الصرف المتعامد ويمكن هنا ملاحظة العديد من الزوايا القائمة بداخله.



شكل 9 ـ 28

نظم الصرف. (أ) ـ متشجر (ب) ـ متعامد (جـ) ـ شعاعى (د) ـ شعرى.

ويتكون هذا النظام من الصرف فى منطقة مقطعة بالصدوع والفواصل. وحيث أن هذه التراكيب يمكن تعريتها بسهولة اكثر من الصخور غير المتأثرة بالصدوع والفواصل فان اشكالها تتحكم فى اتجاهات المجارى المائية.

وعند انطلاق المجارى المائية من منطقة مركزية، فيما يشبه القبّ ببرقق العجلة، يوصف نظام الصرف بالشعاعى (شكل 9 ـ 28 جـ). ويتكون مثل هذا النظام بمناطق مخروطات البراكين المنعزلة وتراكيب القباب المرتفعة.

ويوضح الشكل (9 ـ 28 د) نظام الصرف التعريشى. وهو نظام صرف متعامد تكون فيه الروافد متوازية تقريبا مع بعضها البعض فيما يشبه تعريشة الحدائق. ويتكون مثل هذا النظام للصرف فى مناطق تتكون من طبقات صلبة بينها طبقات ذات مقاومة اقل. ومثال ذلك التكّشفات الطبقية بجبال الأبالاش التى تبرز كلا من الصخور الصلبة والضعيفة المقاومة فى أحزمة متوازية تقريبا.

المجارى السابقة والمركبة للمياه

قد يتحتم فى بعض المناطق دراسة تاريخ المجارى المائية وذلك لتفهم نظم صرفها. فقد يلاحظ مثلا أن احدها يقطع طريقه خلال مرتفع أو جبل. ويسمى مسارها هنا ذو الجانبين الشديدى الانحدار بالثغرة المائية (شكل 9 ـ 29). فلماذا اذن يختار هذا المجرى طريقه خلال المرتفع بدلا من الالتفاف حوله؟ واحد الاحتمالات هنا ان يكون متواجداً من قبل تكون المرتفع او الجبل، ويسمى فى هذه الحالة **مجرى مائى سابق**. وهو الذى يستمر فى قطع مجراه اثناء تكون المرتفع. اما الاحتمال الثانى هو ان المجرى المائى تركب فوق هذا المرتفع الذى تم دفنه تحت صخور أفقية. ومن ثم أخذ مسارا غير ذى علاقة بالتراكيب المدفونة. وبتعميق المجرى لمساره يقابل التركيب المدفون ويستمر فى القطع خلاله. ومثال ذلك مجموعة الانهار المركبة التى تجرى خلال صخور جبال الابالاش المطوية وذلك فى طريقها الى المحيط الاطلسى.

التعرية عند المصدر وقرصنة المجارى المائية

سبق وان رأينا ان المجرى المائى يقوم باطالة قناته عن طريق بناء دلتا عند مصبه. وهو ايضا يستطيع اطالتها بالتعرية عند منشئه. فمع بداية تجمع الماء فى قنوات تزداد سرعته ومن ثم قدرته على التعرية. وينجم عن ذلك تعرية القناة فى اتجاه اعلى المنحدر خلال منطقة كانت تفتقر الى قنوات تصريف (شكل 9 ـ 30).



شكل 9 ـ 29

فجوة مائية بالقرب من فيكتور فيل بكاليفورنيا. يتوقع أن الرسوبيات كانت تغطى المرتفع. وعلى هذا السطح المرتفع بدأ النهر مساره. وبقطع النهر لمجراه قام بالقطع خلال المرتفع أيضا.

وتساعد دراسة التعرية عند المنشأ الى تفهم التغيّرات التى تحدث فى بعض نظم الصرف. واحد اسباب هذه التغيّرات ما يعرف بقرصنة المجارى المائية. عندما يتغير اتجاه نظام الصرف لمجرى مائى كنتيجة لتعرية مجرى مائى آخر لمنشئه. فمثلا اذا ما كان المجرى المائى على احد جانبى قاسم جبلى ذو ممال شديد الانحدار ومجرى مائى على الجانب المقابل ذى ممال طفيف، فان المجرى على الجانب الأول له قدرة اعلى على التعرية من المجرى الثانى، وبالتالى سيقوم بمد قناته عند المنشأ متجاوزا القاسم الجبلى ومحتويا جزءا أو كامل شبكة نظام الصرف على الجانب الآخر. ففى الشكل (9 ـ 31) قد تم احتواء المجرى أ عندما ازاح المجرى ب القاسم الجبلى بينهما عند منشأه الى ان يتقاطع القاسم بالمجرى أ مسببا فى تغيير اتجاهه.

ويرجع كذلك وجود الممرات الضيقة ذات الجوانب الشديدة الانحدار، والتى تفتقر الى أى حركة مائية، الى عملية قرصنة المجارى المائية. وتتكون هذه المجارى المهجورة (وتسمى **الثغرات الهوائية**) بقرصنة مجرى مائى على مجرى آخر محولا اتجاهه (شكل 9 ـ 32).

مراحل تكون حوض الوادي

لقد خالف جيمس هاتون وجون بليفير مفكرى زمانهما باعتقادهما ان الانهار هى المسئولة عن حفر قنواتها. وقد عززت الابحاث الجيولوجية بأحواض الانهار هذا الاعتقاد، واضيف الى ذلك ان هذه الاحواض تتطور باستمرار وفى خطوات منتظمة. وقد اطلق مجازا على مراحل تكوّن الانهار تسميات الشباب والنضوج والكهولة.

فاذا ما كان النهر مستمرا فى تعرية قناته ليصبح ممهدا يعتبر فى مرحلة الشباب. فالمنحدرات والشلالات والقناة الضيقة على شكل V هى من مميزات مرحلة الشباب الدالة على استمرار النهر فى تعرية قناته. ومن علامات هذه المرحلة كذلك الممال الشديد الانحدار وقلة سهول الفيضانات أو انعدامها الى جانب استقامة مساره وغياب التعرجات بهذا المسار (شكل 9 ـ 33 أ).

وعند وصول النهر الى مرحلة النضوج تتوقف عملية التعرية العمودية وتبدأ التعرية الجانبية، أى ان النهر الناضج يبدأ فى قطع سهل فيضانه والتعرج فوقه (شكل 9 ـ 33 ب). وفى هذه المرحلة تبدأ عملية القطع وتكوين اطواق النير. وقد تتكون بعض الارصفة الطبيعية المنخفضة (شكل 9 ـ 33 جـ). وحيث أن معظم الشلالات والمنحدرات قد سويت فان ممال النهر الناضج اقل انحدارا، وقطاعه اكثر تمهيدا من مرحلة الشباب، حيث ان كل المسرعات والشلالات قد اختفت من مجراه.

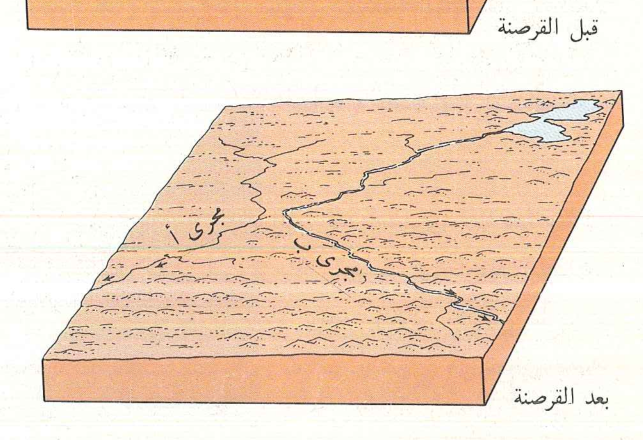
ويدخل النهر مرحلة الكهولة بعد ان يصبح سهل فيضانه اعرض بعدة مرات من نطاق تعرجاته (شكل 9 ـ 33 د). وتصبح هنا القناة بعيدة عن ضفتى الوادى، ويكون دور النهر فى هذه المرحلة اعادة تعرية رسوبيات سهل الفيضان غير المتماسكة. وحيث ان ذلك اسهل من تعرية قاع المجرى الصخرى، فان النهر فى مرحلة الكهولة ينقل مساره من جانب الى آخر اسرع من مرحلة النضوج. ومثال ذلك تحرك بعض تعرجات نهر المسيسبى عشرون مترا فى السنة فى الوقت الذى تنتشر على سهل فيضانه العديد من بحيرات طوق النير والتعرجات القديمة المنفصلة. كما يميز الانهار فى مرحلة الكهولة الارصفة الطبيعية تصحبها المستنقعات الخلفية وروافد اليازو.

قد افترضنا الى حد الآن تغير مستوى القاعدة خلال مراحل تطور النهر من مرحلة الشباب الى مرحلة الكهولة. غير انه فى كثير من الاحيان يرتفع مستوى الأرض مما يزيد من ممال النهر فى مرحلة الشباب ويسرع من معدل قطعه عموديا. ففى حالة ارتفاع مستوى الأرض من تحت نهر فى مرحلة الكهولة فانه يتوقف على التعرية الجانبية ويعيد مرحلة القطع العمودية ويقال عن النهر انه **جدد شبابه**، وتوصف انثناءاته **بالتعرجات المتخندقة** (شكل 9 ـ 34). أما النهر

شكل 9 ـ 30

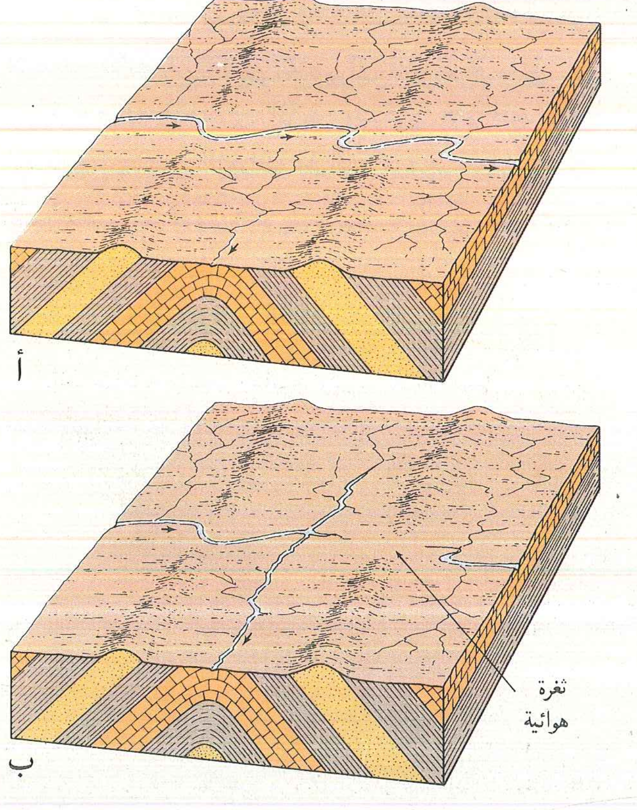
وادى يقوم بمد مساره تجاه المنسأ خلال منطقة لم يسبق شقها بواسطة المجارى المائية.

قبل القرصنة



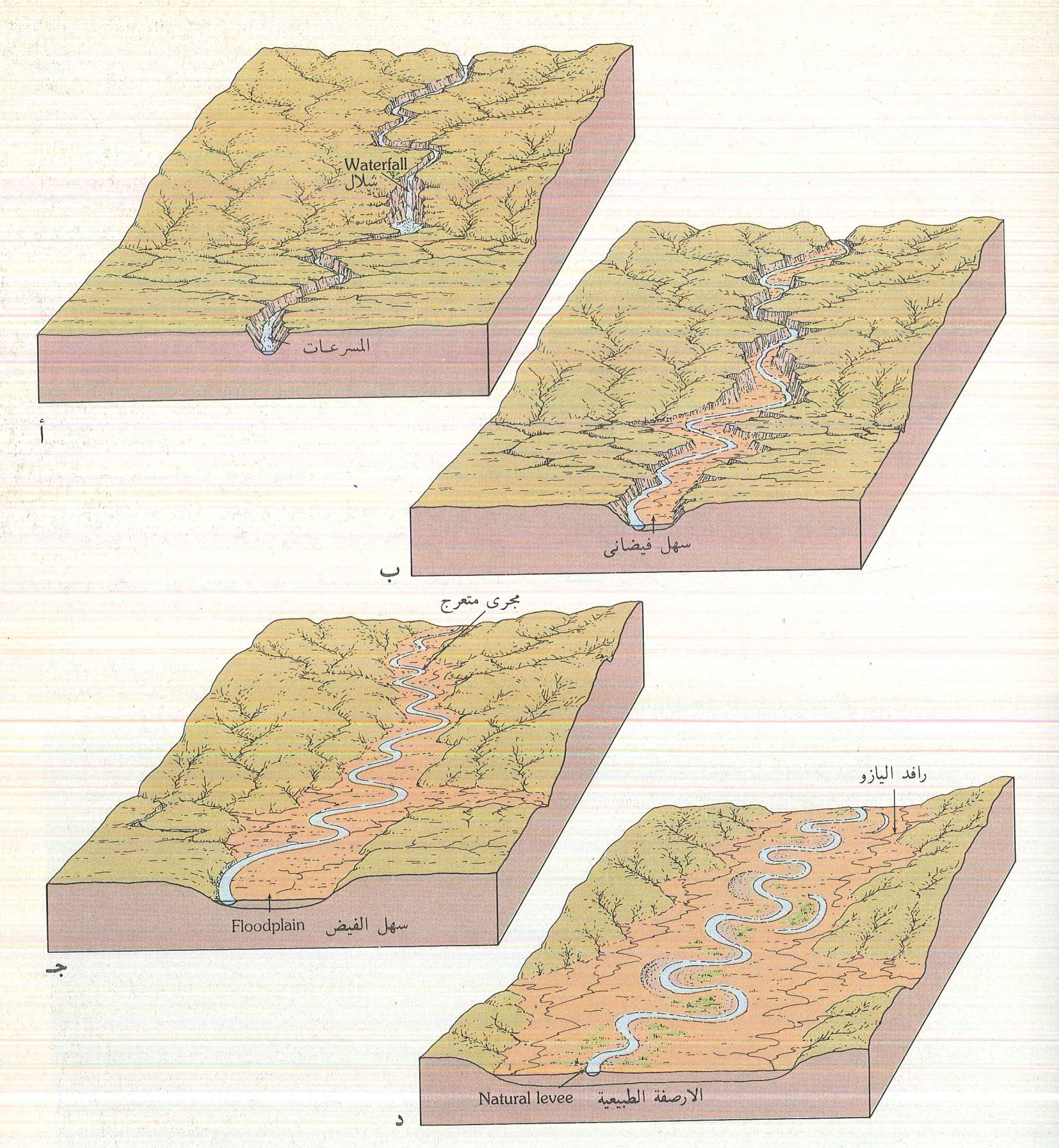
شكل 9 ـ 31

حيث أن ممال المجرى (ب) اكبر من ممال المجرى (أ) فانه يقوم بمد مساره عند المنشأ ليحوى جزءاً من المجرى (أ).



شكل 9 ـ 32

تكوين الثغرة الهوائية



شكل 9 ـ 33

تطور مجرى الوادى. (أ) ـ مرحلة الشباب وهى تتميز بالقطع العمودى وبالوادى الذى على شكل V. (ب) ، (جـ) ـ مرحلة النضوج وهى تتكون عند خفض المجرى لمستوى قاعدته وبدئه فى التعرية الجانبية مكونا واديا عريضا. (د) ـ مرحلة الكهولة والتى يصلها المجرى عند قطعة لوادى أعرض عدة مرات من حزام التعرجات.

الناضج فيعمل عند رفعه الى بناء سهل فيض جديد على مستوى اقل من سهل فيضه الأول تاركا القديم فى تشكيلات مسطحة تعرف بالمصطبات.

وتبقى الاشارة الى نقطتين لهما علاقة بتطور احواض الانهار اولاهما الوقت اللازم للوصول الى مرحلة من مراحل نموه. ويعتمد هذا على عدة عوامل تشمل مقدرة النهر على التعرية ونوع التكوينات التى يمر بها الى جانب ارتفاعه على مستوى القاعدة. فالنهر المبتدىء، الذى يمر بأرضية سهلة وغير متماسكة مع قربه من مستوى القاعدة، قد يصل الى مرحلة النضوج خلال بضع مئات من السنين. وعلى العكس من ذلك فنهر مثل نهر كولورادو والذى ما زال مستمرا فى قطع الجراند كانيون قد احتفظ بمرحلة شبابه لمدة تقدر بحوالى 15 مليون سنة. اما النُقطة الاخرى حول تطور احواض الانهار هى ان النهر قد تصل بعض أجزائه الى مرحلة من مراحل التطور قبل الاجزاء الاخرى. فغالبا ما يصل اسفل النهر الى مرحلة الكهولة بينما نهايته الاخرى ما زالت فى مرحلة الشباب.

دورة تطور تشكُل المعالم السطحية

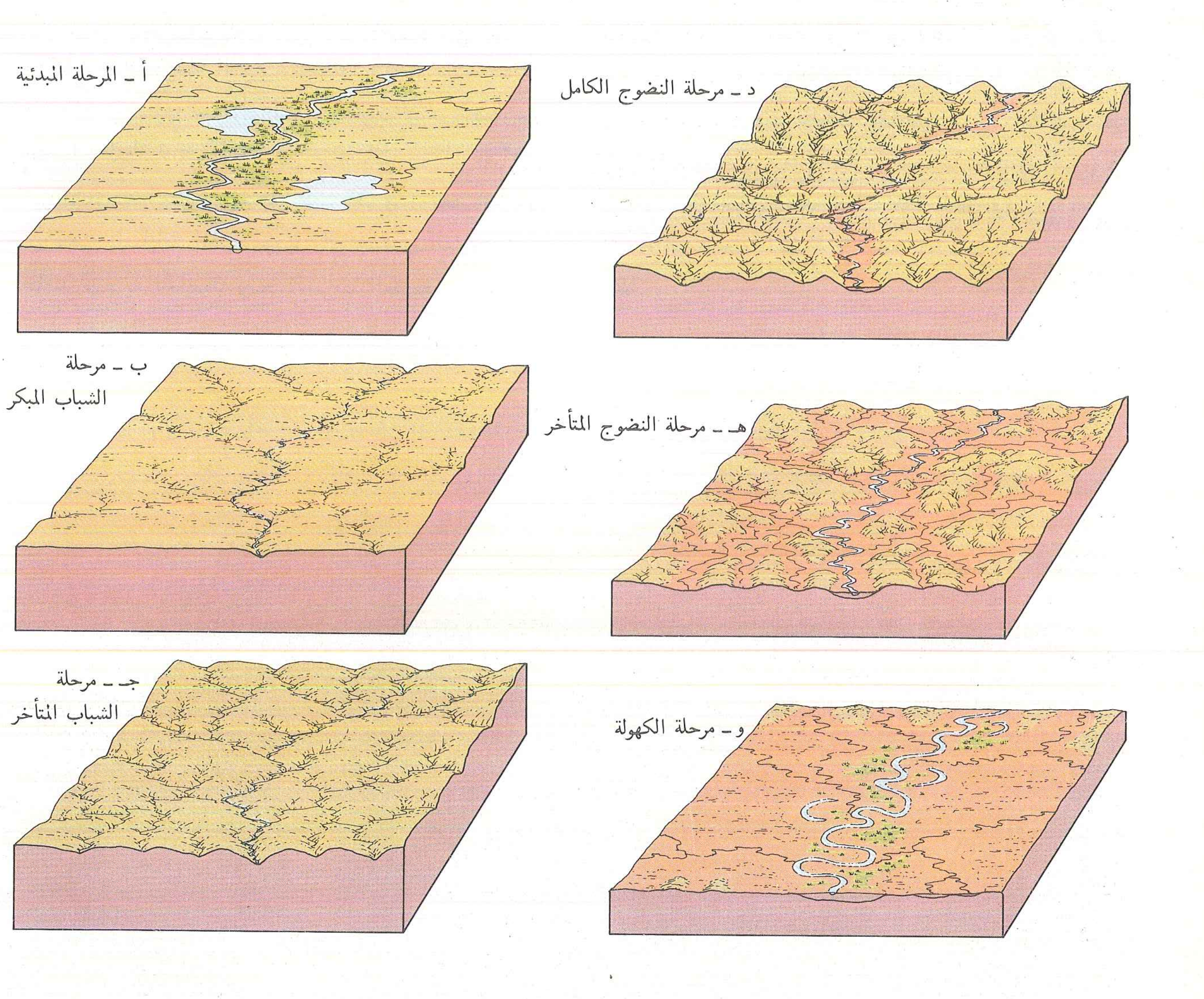
تقوم مسالك المياه اثناء حفر مساراتها بنحت وجه اليابسة. ولشرح هذه العملية المستمرة سنفترض ارضية مسطحة ومرتفعة بمناخ ممطر. فالى أن يتكون مسار مائى فعال تبدأ العملية بانتشار البحيرات والمستنقعات فى كل منخفض بالمنطقة (شكل 9 ـ 35 أ). ومع تكوّن المسارات المائية

شكل 9 ـ 34

تعرجات نهر سان جوان المتخندقة بولاية يوتا الأمريكية. يقطع النهر مجراه فى مرتفع كولورادو.



والبدء فى قطع طريقها الى مستوى القاعدة تقوم الانهار باستنزاف مياه البحيرات، مع الابقاء على وضع المنطقة المسطح طوال مرحلة الشباب تتخللها قنوات ضيقة (شكل 9 ـ 35 ب). ومع استمرار التعرية عموديا تزداد التضاريس وتتحول المنطقة المسطحة الى مرتفعات ووديان وهما من مميزات مرحلة النضوج (شكل 9 ـ 35 جـ). ومن الطبيعى ان بعض المسارات المائية سيصل الى مستوى القاعدة محولا طاقته للتعرية الجانبية. ومع اقتراب الدورة من مرحلة الكهولة تعمل تأثيرات التدفق الصفحى وتبدد الكتل والتعرية الجانبية مجتمعة على تحويل سطح الأرض الى سهب بالقرب من مستوى القاعدة (شكل 9 ـ 35 و). وبالرغم من عدم وجود سهب بالوقت الحاضر الا ان الدلائل تشير الى انها تكونت ثم ارتفع مستوى منسوبها مما يضع الدورة فى بدايتها مرة اخرى. وقد يحدث هذا الرفع قبل ان تصل الدورة الى مرحلة الكهولة مما يقطع تسلسلها لتبدأ مجددا من أولها.



شكل 9 ـ 35

نموذج مثالى لدورة تطور المعالم الطبيعية. (أ) ـ المرحلة المبدئية حيث تفتقر الأرض الى نظام صرف وتقع فوق مستوى القاعدة. (ب) ـ مرحلة الشباب المبكر حيث تقوم المجارى المائية بقطع مسارات لها على السطح وتجفف المستنقعات. لا تزال المساحة بين المجارى المائية مسطحة نسبيا. (جـ) ـ مرحلة الشباب المتأخر. (د) ـ مرحلة النضوج حيث قامت المجارى المائية بتعرية كل المساحة الواقعة فيما بينها لتتركها فى شكل منحدرات. (هـ) ـ مرحلة النضوج المتأخر. (و) ـ ومرحلة الكهولة تقوم التعرية الجانبية وتبدد الكتل بخفض مستوى معظم المرتفعات الى مستوى سهل الفيضان.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ اشرح حركة الماء داخل الدورة المائية. ما هى المسالك المتوفرة للماء حال نزوله على سطح الأرض؟

2 ـ لماذا لا ينخفض مستوى سطح البحر بالرغم من أن التبخر فى المحيطات لا تضاهيه قيمة المياه المتساقطة عليها؟

3 ـ عدّد العوامل المتحكمة فى مقدار الارتشاح.

4 ـ يتحرك الماء مبدئيا فى رقائق. اشرح باختصار مدى صحة هذه الجملة.

5 ـ اذا كانت بداية احد الانهار تقع على ارتفاع 2 000 متر من سطح البحر فما هو معدل مماله بالمتر الى الكيلومتر الواحد اذا كان طوله 250 كيلومترا؟

6 ـ اذا وصل طول النهر المذكور فى السؤال 5 حوالى 500 كيلومتر لتعرجه، احسب مماله الجديد، واذكر مدى تأثير التعرجات على المال.

7 ـ ماذا يحدث لسرعة المجرى المائى اذا ما زادت قيمة دفقه؟

8 ـ ماذا يحدث عادة لعرض وعمق قناة مجرى مائى وكذلك سرعته وتدفقه من المنشأ الى المصب؟ استعن بالشكل 9—8 . اشرح باختصار سبب كل هذه التغيرّات.

9 ـ كيف تتوقع أن تتأثر المجارى المائية بمنطقة تم اعمارها حديثا؟

10 ـ عرّف مستوى القاعدة. اذكر احد المجارى المائية بمنطقتك. هل يعتبر مستوى قاعدة لمجارى مائية اخرى؟

11 ـ لماذا تتميز المجارى المائية بانخفاض قيمة ممالها قرب المصب؟

12 ـ اشرح ثلاثة وسائل يمكن بواسطتها للمجرى المائى ان يعمل على تعرية قناته. أىّ هذه الوسائل مسئول عن تكوين الفجوات الدردورية؟

13 ـ اذا ملأت كاسا من ماء احدى المجارى المائية فأى أنواع الحمولة تتوقع ان يترسب أولا؟ وأى جزء تتوقع أن يبقى فى الماء؟ وأى أجزاء الحمولة لا تتوقع وجودها فى عيّنتك؟

14 ـ ما هى سرعة الترسب؟ ما هى العوامل المؤثرة فى سرعة الترسب؟

15 ـ ميّز بين الاستيعاب والكفاءة.

16 ـ اشرح احد الظروف اللازمة لتكون مجرى مجدُول.

17 ـ تحتاج حبيبات الطين الدقيقة الى سرعة أكبر لدفعها بينما تحتاج حبيبات الرمل الاكبر حجما الى سرعة أقل. وضح ذلك.

18 ـ اشرح باختصار كيف تتكون الارصفة الطبيعية. ما علاقة هذه الظاهرة بالمستنقعات الخلفية وروافد اليازو؟

19 ـ ما هو وجه الشبه بين الدلتا والمراوح الركامية؟ ما هو الفرق بينهما؟

20 ـ ما هو الغرض من انشاء قنوات القطع الصناعية؟

21 ـ تشير كل من الجمل التالية الى نوع من نظم الصرف، اذكر كلا منها:

أ ـ مجارى مائية منطلقة من مرتفع عال مثل القبة.
ب ـ متفرع مثل الشجرة.
جـ ـ يتكون عندما تكون صخور المنطقة مقطعة بالفواصل وبالصدوع.

22 ـ اشرح كيف تتكون الثغرةالمائية.

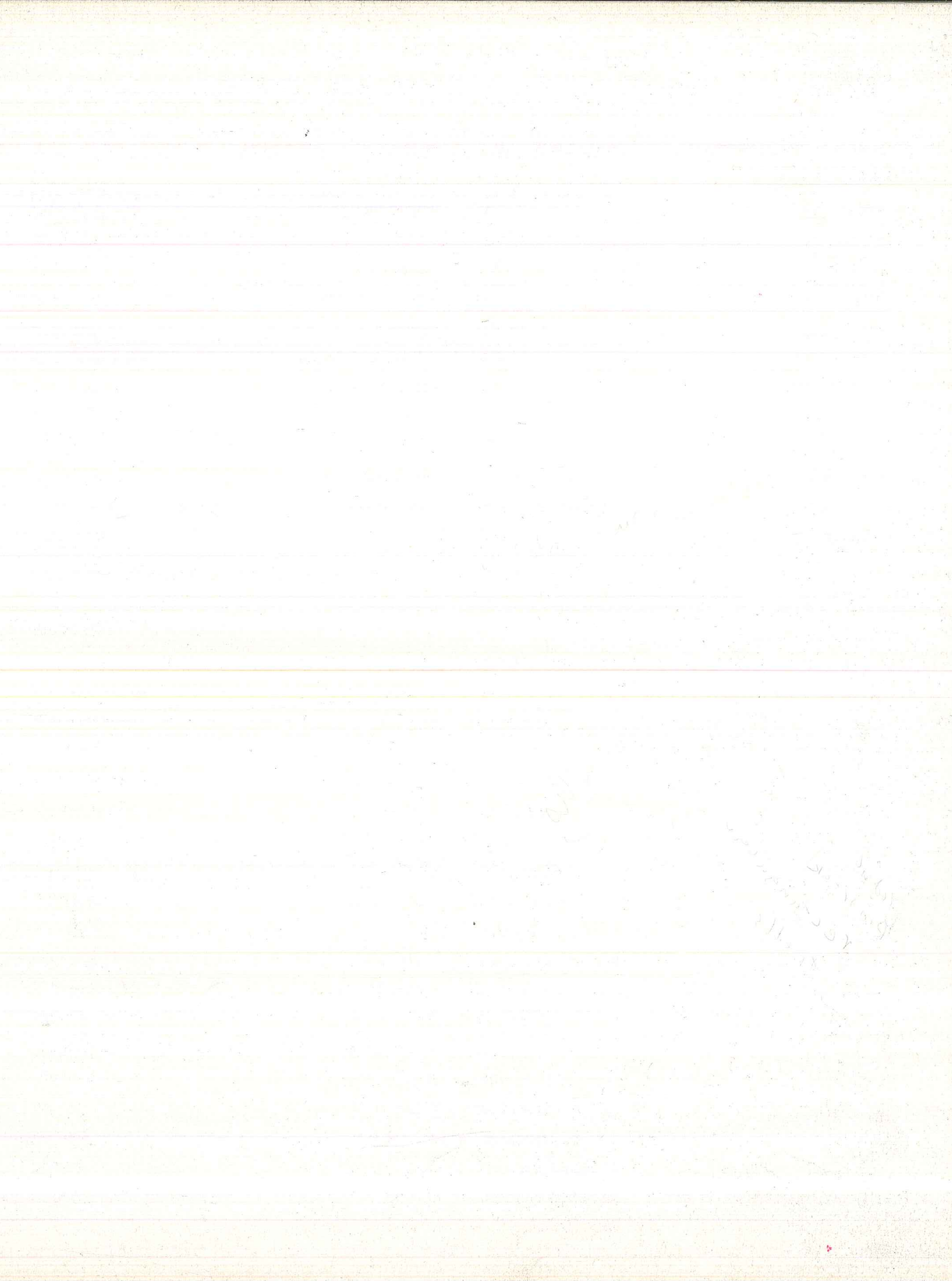
23 ـ كيف يمكن أن يكون النهر فى مرحلة الشباب وهو اقدم (بالسنوات) من نهر فى مرحلة الكهولة؟

24 ـ هل تصلح الانهار فى مرحلة الكهولة كحدود سياسية؟ اشرح.

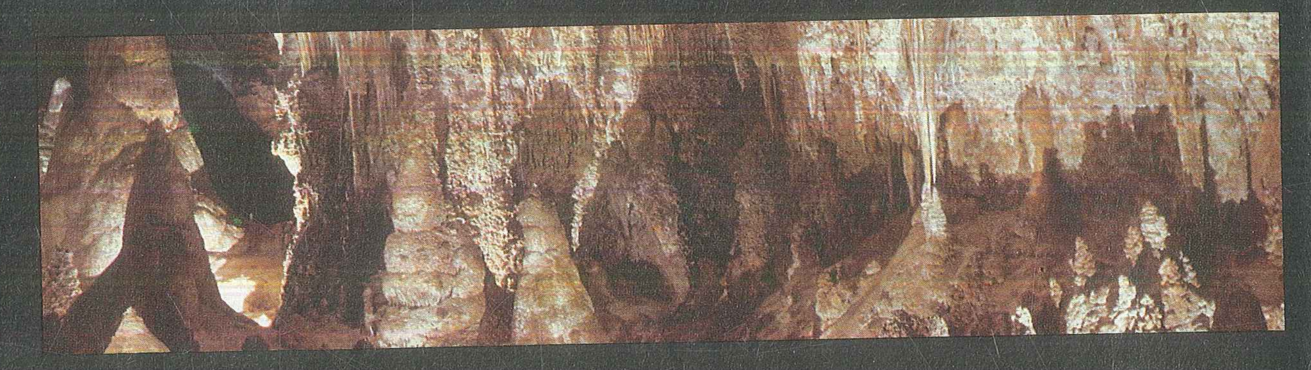
الكلمات الدالة:

ارتشاح	**infiltration**
استيعاب	**capacity**
بحيرة طوق النير	**oxbow lake**
تبخر ونتح	**evapotranspiration**
تدفق صفحى	**sheet flow**
تدفق عكر	**turbulent flow**
تدفق رقائقي	**laminar flow**
ترعة أو موزِّع	**distributary**
تعرج	**meander**
تعرجات متخندقة	**entrenched meander**
تعرية المنشأ	**headward erosion**
ثغرة مائية	**water gap**
ثغرة هوائية	**wind gap**
جداول	**rills**
حمولة القاع	**bed load**
حمولة ذائبة	**dissolved load**
حمولة معلقة	**suspended load**
حوض الصرف	**drainage basin**
دفق	**discharge**
دلتا	**delta**
دورة مائية	**hydrologic cycle**
رافد اليازو	**yazoo tributary**
رسوبيات لسان المجرى	**point bar**
رصيف طبيعي	**natural levee**
سرعة الترسب	**settling velocity**
سعة الارتشاح	**infiltration capacity**
سهب	**peneplain**
سهل فيضان	**floodplain**
شلاّل	**waterfall**
ضفة القطع	**cut bank**
طبقات القاعدة	**bottomset beds**
طبقات القمة	**topset beds**
طبقات المقدمة	**foreset beds**
طمى	**alluvium**
عقبة	**bar**
فترة فاصلة	**lag time**
فجوة دردورية	**pothole**
فرز	**sorting**

English	Arabic
temporary (local) base level	مستوى قاعدة مؤقت
ultimate base level	مستوى قاعدة نهائى
mouth	مصب
terrace	مصطبة
gradient	ممال
head (headwaters)	منبع
runoff	مياه جارية
transpiration	نتح
meander scar	ندبة التعرج
radial pattern	نظام صرف شعاعى
trellis pattern	نظام صرف شعرى
dendritic pattern	نظام صرف متشجر
rectangular pattern	نظام صرف متعامد
saltation	وثب
divide	قاسم جبلى
stream piracy	قرصنة المجرى
longitudinal profile	قطاع طولى
cutoff	قناة القطع
competence	كفاءة
antecedent stream	مجرى سابق
stream	مجرى مائى
rejuvenated stream	مجرى مجدد شبابه
braided stream	مجرى مجدول
superposed stream	مجرى مركب
graded stream	مجرى ممهد
alluvial fan	مروحة ركامية
back swamp	مستنقع خلفى
base level	مستوى قاعدة



10



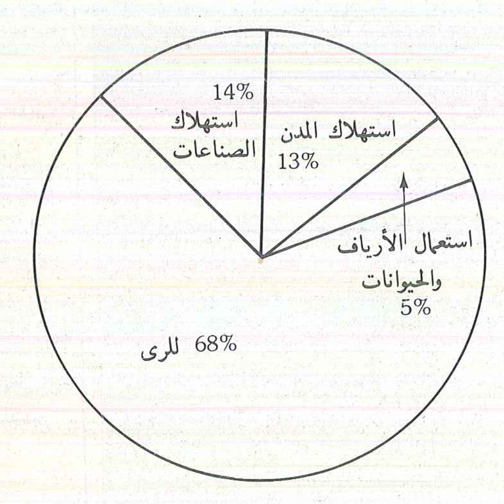
المياه الجوفية


10

بالرغم من ضخامة كمية المياه المخزونة بالصخور الرسوبية تحت سطح الأرض، نجد انها لا تزيد عن ستة اعشار من الواحد بالمائة من مجموع كمية المياه بالكرة الأرضية. وحسب تقديرات المتخصصين فان كمية المياه بالثمانمائة متر العليا من القشرة الأرضية، تضاهى ثلاثة آلاف ضعف حجم المياه بجميع أنهار المعمورة، وما يقارب عشرين ضعفا لحجم مياه الانهار والبحيرات مجتمعة.

مدخل التجويف الكبير بمغارة كارلسباد والتى عملت المياه الباطنية على زخرفتها.

وفى كثير من أرجاء العالم لا تقتصر اهمية مياه الآبار والينابيع على حاجات الاعداد الهائلة من البشر، بل تشمل الى جانب ذلك المحاصيل والماشية ومجالات الصناعة المختلفة (شكل 10 ـ 1). ومن آثار التعرية الناتجة عن المياه الباطنية تكوّن المغارات والملامح المشابهة لها.



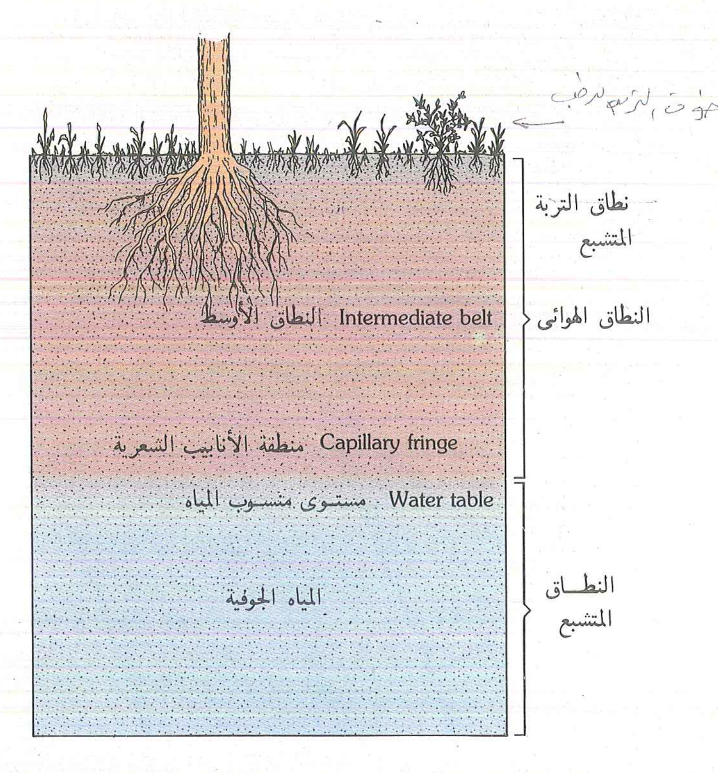
شكل 10 ـ 1

تم تقدير استهلاك المياه الجوفية سنة 1980 بحوالى 334,5 بليون لتر يوميا. منهـا 68 % للرى و13 % استهلاك المدن و5% بالأرياف.

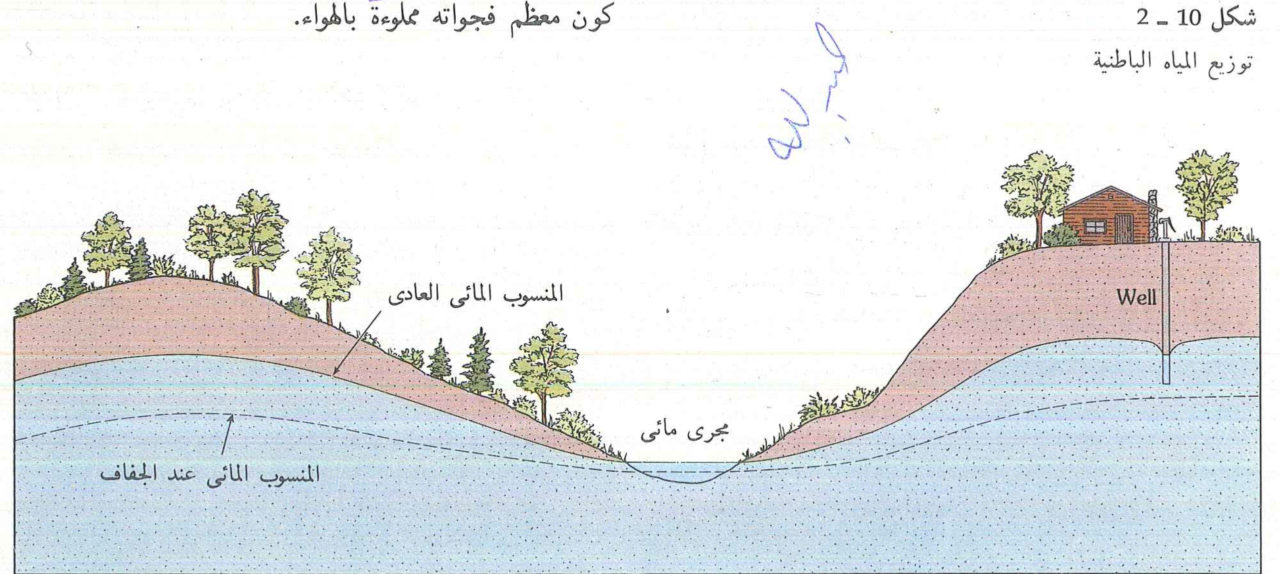
توزيع المياه الباطنية

عند هطول مياه الأمطار يجرى جزء منها فى مسارات على السطح ويتبخر جزء آخر، أما الباقى فينفذ الى باطن الأرض. ويمثل هذا الأخير عموما المصدر الرئيسى للمياه الباطنية. وتختلف كمية المياه التى تأخذ احد هذه المسارات باختلاف ظروف المكان حيث انها تعتمد على عدة عوامل، تشمل شدة الانحدار وطبيعة مكونات السطح وكمية الامطار الى جانب نوع وكثافة الغطاء النباتى. فالأمطار الغزيرة الهاطلة على انحدار شديد وكتيم سينتج عنها حتما كمية كبيرة من المياه الجارية، غير ان الانحدار الطفيف المكون من مواد تسمح للمياه بالمرور من خلالها سينتج عنه كميات اكبر من المياه الباطنية.

وبعض المياه المتسربة الى ما تحت السطح لا تنساب بعيدا حيث انها تقع تحت تأثير الانجذاب الجزيئى مكونة غشاء على سطح حبيبات التربة. ويتبخر فيما بعد جزء من هذه المياه وتستفيد النباتات بمعظم الجزء الباقى بين فترات هطول الامطار. اما الجزء الباقى، المتسرب الى ما تحت السطح وغير العالق بطوق التربة الرطب، يستمر فى تعمقه الى ان يقابل الطبقة المشبعة أى التى تمتلىء جميع الفراغات بين مكوناتها (شكل 10 ـ 2). وتسمى المياه فى هذا النطاق المشبع بالمياه الجوفية، كما تعرّف الحدود العلوية لهذا النطاق بالمنسوب المائى. ويعلو المنسوب المائى منطقة الانابيب الشعرية، وفيها يرتفع الماء فى اتجاه معاكس للجاذبية بواسطة خاصية الشد السطحى فى مسارات شعرية دقيقة بين حبيبات التربة أو الرسوبيات. ويمكن تجسيد هذه الخاصية بوضع طرف ورق الحمام فى الماء ومشاهدة البلل يرتفع الى الجزء الباقى. ويسمى الجزء العلوى لمنسوب الماء، والشامل على منطقة الانابيب الشعرية وطوق التربة الرطب، بالنطاق الهوائى وهو على عكس النطاق المشبع فى كون معظم فجواته مملوءة بالهواء.



شكل 10 ـ 2
توزيع المياه الباطنية



شكل 10 ـ 3
عادة ما يعكس المنسوب المائى تضاريس السطح. عند مواسم الجفاف يهبط المنسوب المائى مسببا نقصان الماء بالمجرى وجفاف بعض الآبار.

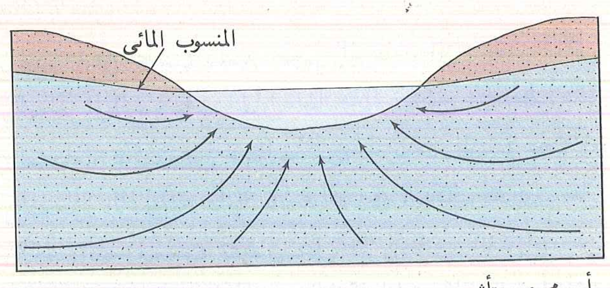
منسوب الماء

يعتبر المنسوب المائى والذى يمثل الحد العلوى للنطاق المشبع ظاهرة ذات أهمية كبيرة لتفهم المياه الجوفية. ويعتمد التنبؤ بسلوك الآبار على مستوى منسوب الماء بها كما يعتمد عليه التغيير فى قوة تدفق العيون والانهار والتذبذب فى مستوى الماء بالبحيرات.

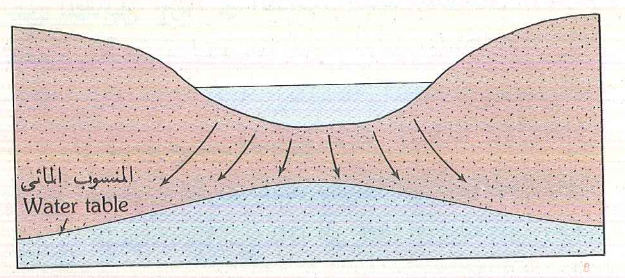
وبالرغم من عدم مقدرتنا على رؤية المنسوب المائى فانه بالامكان توضيحه على خرائط، ودراسته بتفصيل عند توفر العديد من الآبار، حيث أن موقعه يتطابق والحد الأعلى لنطاق التشبع. وتبين خرائط المنسوب المائى انه ليس افقيا بمعنى الكلمة، بل يعكس طبوغرافية السطح الذى يعلوه، بارتفاع اقصى تحت التلال متناقصا فى اتجاه الوديان (شكل 10 ـ 2). ويتساوى المنسوب المائى مع سطح الماء بالمستنقعات، ويعلو سطح الأرض بالبحيرات والأنهار.

وهناك عدة عوامل تؤدى الى عدم انتظام مستوى سطح المنسوب المائى. منها التباين فى كمية الامطار والنفاذية من مكان الى آخر، والتى قد تؤدى الى عدم توازن تسرب الماء وبالتالى اختلاف ارتفاع المنسوب المائى. ومن اهم العوامل المؤدية الى عدم الانتظام هو ان المياه الجوفية، تتحرك ببطء وبمعدلات مختلفة تحت ظروف مختلفة. فمثلا المياه الجوفية والبعيدة عن مجارى الأنهار فى وسط التلال، هى ابطأ فى حركتها من تلك القريبة من مجارى الانهار. وعليه فان المياه تتجمع تحت التلال. وعند توقف هطول الأمطار فان الجزء المرتفع من المنسوب المائى تحت التلال يهبط تدريجيا حتى يقترب من مستوى الوديان، غير ان هطول الامطار من آن الى آخر يحول دون ذلك. وعليه فان استمرار الجفاف مدة من الزمن يؤدى الى نضوب آبار المياه الجوفية الضحلة (شكل 10 ـ 3).

وفى المناطق الممطرة نجد ان الأنهار يتم امدادها وبشكل مستمر بالمياه الجوفية. وتعرف هذه الأنهار بالمتأثرة (شكل 10 ـ 4 أ). أما فى المناطق الجافة، حيث ان المنسوب المائى يكون بعيدا عن السطح، تفقد الانهار القادمة من المناطق الممطرة كميات من الماء مغذية باستمرار النطاق المشبع تحتها مما يسبب فى انحناء مستوى المنسوب المائى الى اعلى. ويشار الى الأنهار فى هذه الحالة بالمؤثرة (شكل 10 ـ 4 ب).



أ ـ مجرى متأثر



ب ـ مجرى مؤثر

شكل 10 ـ 4

(أ) ـ تميز الأنهار المتأثرة المناطق الممطرة حيث تستمد البعض من مياهها من نطاق التشبع. (ب) ـ وتميز الأنهار المؤثرة المناطق الصحراوية حيث يعمل الماء المتسرب الى المنسوب المائى فى رفع مستوى المنسوب المائى على شكل محدب تحت المجرى.

المسامية والنفاذية

تختلف كمية المياه المخزنة والمياه التى تجرى على السطح بناء على اختلاف طبيعة مواد تحت السطح حيث ان المياه تتسرب الى باطن الأرض لوجود فجوات او فتحات بالصخور او الرسوبيات او التربة. وتشبه هذه الفتحات فراغات الاسفنج. وغالبا ما تسمى بالفراغات المسامية. وعموما تعتمد كمية المياه التى يمكن تخزينها على مسامية

المادة، التى تحسب بنسبة حجم الفرغات الى الحجم الكلى للصخر أو الرسوبيات الحاوية لها. وبالرغم من ان معظم هذه الفتحات تتكون من فجوات بين جزئيات الرسوبيات او الصخور الرسوبية، فانها قد تتواجد فى اشكال اخرى، مثل الكييسات (فجوات تتكون على اثر انطلاق الغازات من الحمم البركانية) أو الصدوع والانكسارات والفجوات الناتجة عن المحاليل المؤثرة فى الصخور القابلة للذوبان كالحجر الجيرى.

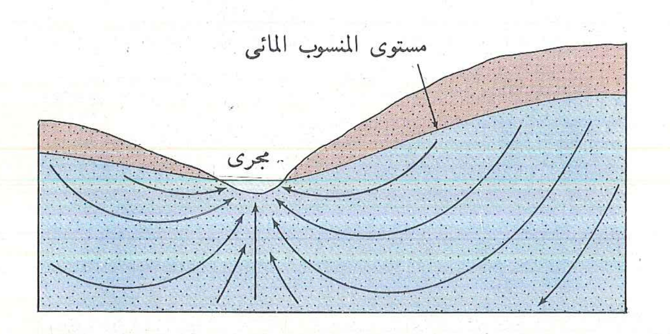
وكما هو متوقع فان المسامية تختلف اختلافا كبيرا حسب أنواع الصخور. فالرسوبيات عموما غنية بمسامها، حيث تتراوح الفجوات بها من 10 الى 50 فى المائة من الحجم الكلى. وتعتمد نسبة المسام على حجم وشكل الحبيبات وكذلك مدى رزمها ودرجة فرزها ونوع مادة اللصاق وحالة الصخور الرسوبية. فمثلا تصل مسامية الطفلة الى 50 بالمائة فى الوقت الذى تكوّن فيه الفجوات ما يقارب 20 بالمائة لكثير من الرمال والحصى. وتقل المسامية بخلط مواد من أحجام مختلفة، حيث أن الحبيبات الصغيرة تعمل على سد الفجوات بين الحبيبات الاكبر حجما. اما الصخور النارية والمتحولة وبعض الصخور الرسوبية فهى قليلة المسامية، وذلك لشدة تشابك بلورات مكوناتها. وقد تكون الفتحات بين حبيبات صخر ما غير ذات اهمية ولا تزيد قيمتها عن واحد او اثنين بالمائة، وعليه فان تشققها هو السبيل الوحيد الى زيادة مساميتها.

والمسامية ليست المقياس الوحيد الدقيق الذى يعتمد عليه فى الحصول على المياه الجوفية. فقد يكون الصخر أو الرسوبيات ذات مسامية عالية، غير انها لا تسمح للماء بالمرور خلالها. وعليه فان **النفاذية** وهى قدرة الماء على تمرير السوائل تعتبر ذات اهمية فى هذا الشأن. فالمياه الجوفية تتحرك فى مسالك ملتوية ومتعرجة خلال فتحات صغيرة، وكلما صغرت المسام كلما ازداد بطء حركة المياه خلالها. واذا ما كانت الفجوات صغيرة جدا فان غشاء الماء الملتصق بالحبيبات يمس بعضه البعض ويتداخل مما ينتج عنه قوة الانجذاب الجزيئى، التى تعمل على تثبيت المحتوى المائى فى مكانه. ويمثل هذه الظاهرة الرسوبيات الطفلية. فبالرغم من مقدرتها العالية على تخزين الماء، فان صغر حجم فجواتها يمنعه من الحركة. ويطلق على الطبقات **غير المنفذة** للماء كالطين تسمية الطبقات اللامائية. وبالعكس من ذلك فان الرمل والحصى بها مسام اكبر، وعليه فان الماء بفجواتها لا يقع تحت تأثير الانجذاب الجزيئى، ويمكنه الحركة بحرية اكبر. وتسمى هذه الصخور او الرسوبيات **المنفذة** والتى تمرر الماء بالطبقات المائية.

وباختصار فقد رأينا ان المسامية لا يعتمد عليها دائما فى تقدير كمية الماء الممكن الحصول عليها، وان النفاذية عامل مهم لحركة الماء وكميته، والتى يمكننا ضخها من بئر ما.

حركة المياه الجوفية

تعتمد المياه الجوفية فى حركتها على الجاذبية. فكرد فعل للجاذبية يتحرك الماء من مناطق بها منسوب مائى عالٍ الى مناطق ذات منسوب مائى منخفض فى اتجاه قناة مجرى مائى أو بحيرة أو عين. وبعض المياه تأخذ طريقها اسفل منحدرات المناسيب المائية مباشرة، غير أن معظمها تتبع ممرات ملتوية تجاه نطاق الدفق. فكما يبين الشكل 10 ـ 5



شكل 10 ـ 5

تشير الأسهم الى حركة المياه الجوفية خلال طبقة نفاذه متجانسة. ويعتقد بأن الانحناء يعمل على التعادل بين الجاذبية من جهة واتجاه الماء للحركة الى المناطق ذات الضغط المنخفض من جهة اخرى.

فان الماء ينفذ الى المجرى من كل الاتجاهات بما فى ذلك العمودى منها اى فى اتجاه معاكس للجاذبية. ويحدث ذلك لاختلاف ارتفاع المنسوب المائى الذى ينتج عنه اختلاف فى ضغط المياه الجوفية عند ارتفاع معين. وبمعنى آخر فان الماء يكون تحت ضغط اعلى اسفل المرتفعات منه تحت المجرى المائى، مما يدفعه للانسياب تجاه منطقة الضغط المنخفض. وعليه فان الممرات الملتوية التى يتبعها الماء فى نطاق التشبع قد تكون لمعادلة قوة الجاذبية الى اسفل والحركة تجاه مناطق الضغط المنخفض.

وقد تم وضع اسس المفهوم الحديث لحركة المياه الجوفية خلال منتصف القرن التاسع عشر. فقد وضع هنرى دارسى، وهو مهندس فرنسى كان يدرس احتياجات مدينة ديجون الفرنسية من المياه، قانوناً لا يزال يحمل اسمه. فقد وجد دارسى انه اذا ما ثبت مقدار النفاذية فان سرعة الماء تزيد بزيادة انحدار المنسوب المائى. ويعرف انحدار المنسوب المائى **بالمهال المائى**، وهو يحسب بقسمة المسافة العمودية بين نقطة اعادة التشبع ونقطة الدفق **(المسافة الرأسية)** على مسافة انسياب الماء بين هاتين النقطتين ويمكن صيغة قانون دارسى كما يلى:

$$س = ك \frac{ر}{ل}$$

حيث تمثل (س) السرعة و (ر) المسافة الرأسية و (ل) مسافة الانسياب و (ك) معامل النفاذية.

ونظرا لكمية الاحتكاك العالية فان الماء يتحرك ببطء شديد. وهذا من حسن الحظ حيث ان حركة الماء البطيئة تمنع الخزانات المائية من النضوب السريع. فاذا ما تحركت المياه الجوفية بنفس سرعة المجارى المائية السطحية فان الآبار تنضب بعد فترة قصيرة من توقف هطول المطر.

وقد تم حساب معدل حركة الماء بطرق مباشرة عديدة. واحد هذه الطرق وضع صبغة فى احد الآبار ثم يحسب الزمن اللازم لانتقالها الى بئر أخرى على بعد معلوم. وقد استعملت كذلك المواد المشعة، وخاصة نظائر الكربون المشعة (كربون 14) فى ايجاد سرعة حركة المياه الجوفية. فعند دخول الماء الى باطن الأرض فان ثانى اكسيد الكربون الذائب به يحتوى على كمية من كربون 14 . وبنفاذ الماء بالتدريج خارج الأرض يتحلل الكربون المشع. ويقاس معدل الحركة بحساب المسافة بين مكان تسرب الماء ومكان سحبه وقسمة ذلك على العمر المقاس بواسطة العنصر المشع. هذا وقد بينت مثل هذه التجارب بأن سرعة الماء متباينة بشكل كبير. فبالرغم من ان المعدل النموذجى لحركة المياه داخل الكثير من الطبقات المائية يبلغ حوالى 15 مترا فى السنة (4 سنتيمترات فى اليوم) فقد تم قياس سرعة تفوق هذا المقدار بحوالى 15 ضعفا وذلك فى المناطق ذات النفاذية العالية جدا.

العيون

اثارت العيون انتباه وحيرة البشر منذ آلاف السنين، حيث انها كانت ولا زالت عند البعض ظاهرة غريبة يصعب فهم كنهها. ويلاحظ هنا تدفق الماء من مصدر لا ينضب تحت جميع الظروف المناخية. وبناء عليه سادت اعتقادات طريفة محاولة تفسير مصادر العيون. وبالرغم من عدم صحتها الا ان بعضها بقى متداولا حتى الآن، منها ان العيون تستمد مياهها من المحيطات، غير ان معضلة ازالة الأملاح من مياه المحيطات وانتقالها الى اعالى الجبال بقيت تطرح نفسها دون اجابة. وتفسير آخر لقى مساندة العالم ارسطو هو احتمال تكثف بخار ماء الهواء الجوى النافذ الى مغارات تحت السطح.

وقد كان الاعتقاد سائدا حتى اواسط القرن السابع عشر بأن مياه الأمطار لا يمكن أن تكفى لتغذية العيون والأنهار مجتمعة. وقد اثبت عدم صحة ذلك عالم الطبيعة الفرنسى بيير بيرولت، الذى دأب على حساب متوسط المياه الجارية بنهر السين سنويا عن طريق حساب الصرف المائى للنهر. وبعد اخذ كمية الماء المتبخرة فى الحسبان وجد ان

ولا يقتصر وجود العيون على مناطق المناسيب المائية المعلقة بل هناك أنواع من العيون تنبع من خلال صخور بلورية عديمة النفاذية وذلك من خلال الصدوع والتشققات او قنوات التحلل داخل هذه الصخور. فاذا ما تقاطعت هذه المسالك المائية بسطح الأرض على احد المنحدرات تكونت عين مائية.

الآبــار

من أكثر مصادر المياه المستعملة شيوعا **البئر** وهو فتحة يتم حفرها للوصول الى النطاق المشبع. وتمثل الآبار خزانات صغيرة يتجمع فيها الماء ليتم فيما بعد ضخه الى سطح الأرض. وبالرغم من امتداد تاريخ الآبار الى عدة قرون سالفة فإن أهميتها ما زالت قائمة الى الوقت الحاضر حيث ان المساحات المروية بمياه الآبار تزيد فى كثير من بلدان العالم عن تلك المروية بمياه الأنهار.

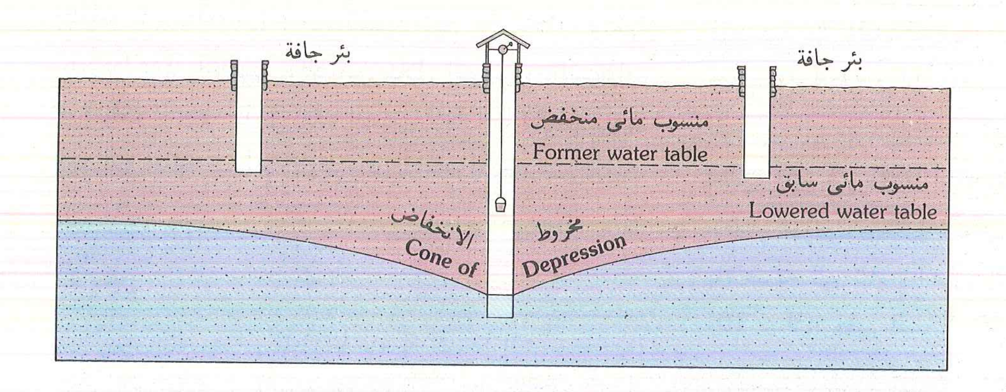
ومستوى الماء بالآبار دائم التغيير تبعا لفصول السنة. فهو ينخفض خلال الفصول الجافة ويرتفع بعد هطول الأمطار. وعليه للتأكد من استمرار الانتاج المائى لأى بئر يفضل أن تكون نهايتها عدة امتار تحت المنسوب المائى.

وعند سحب المياه من بئر ينزل مستوى المنسوب المائى حول البئر المائى وينقص مدى تأثير هذه الظاهرة والمسماة **بظاهرة انخفاض المنسوب**، وذلك كلما ابتعدنا عن البئر. وينتج عن ذلك انخفاض المنسوب المائى فى شكل مخروط يعرف **بمخروط الانخفاض** (شكل 10 ـ 8). وحيث ان مخروط الانخفاض يزيد من الممال المائى بالقرب من البئر فان المياه الجوفية تنساب بسرعة اكبر تجاه الفتحة. فمخروط الماء يساعد فى دفع الماء تجاه البئر الصغيرة ذات الاستعمال اليومى المحدود. أما فى حالة استعمال البئر للرى أو فى الأغراض الصناعية، فان الضخ سينتج عنه مخروط انخفاض كبير وشديد الانحدار، مما ينزل من مستوى المنسوب المائى فى المنطقة ويسبب فى جفاف الآبار الضحلة القريبة منه (شكل 10 ـ 8).

وحفر بئر مائية منتجة تمثل مشكلة مألوفة فى المناطق المعتمدة على المياه الجوفية. فقد يمكن العثور على الماء عند عمق 10 أمتار فى بئر ما، بينما يلزم حفر ضعف هذا العمق للوصول الى مصدر مناسب فى بئر مجاورة. وقد يلزم الحفر الى اعماق اكثر من ذلك، أو تجدنا مضطرين لاعادة الحفر فى منطقة اخرى. وبعض اسباب حفر الآبار غير المنتجة بالاضافة الى تباين اعماق الآبار المنتجة يوضحها الشكل (10 ـ 9). ففى الشكل 10 ـ 9 أ يعتبر المنسوب المائى المعلق سببا فى الاختلاف، حيث ان البئر المنتجة قد نفذت الى الماء فوق طبقة الطين بينما البئر غير المنتجة لم تصادف هذا المنسوب ولم تكن على عمق كاف للنفاذ الى مستوى المنسوب المائى الرئيسى. ويبين الشكل 10 ـ 9 ب الصعاب المتوقعة عند حفر بئر فى منطقة صخور بلورية، حيث أن وجود الماء يقتصر على الشقوق. ويعتمد حِفر البئر المنتجة فى هذه الحالة على الصدفة فى اختراق شبكة كافية من التشققات الصخرية.

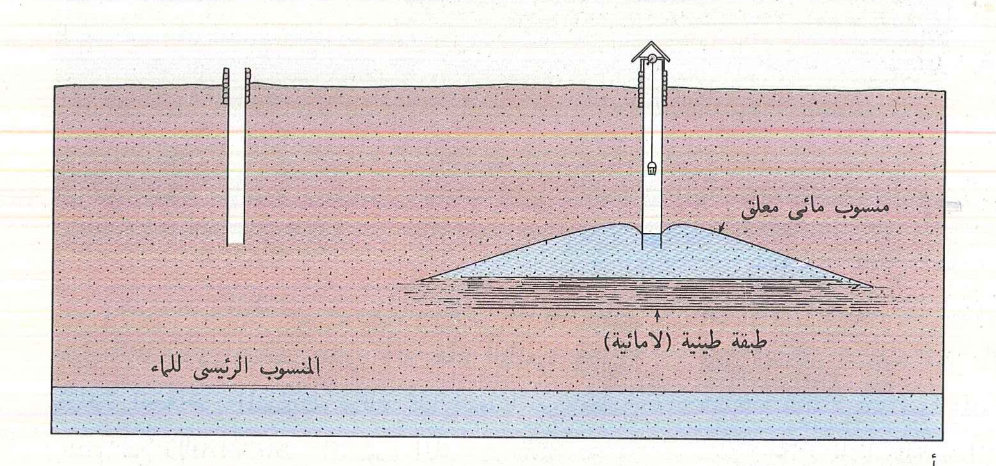
الآبار الارتوازية

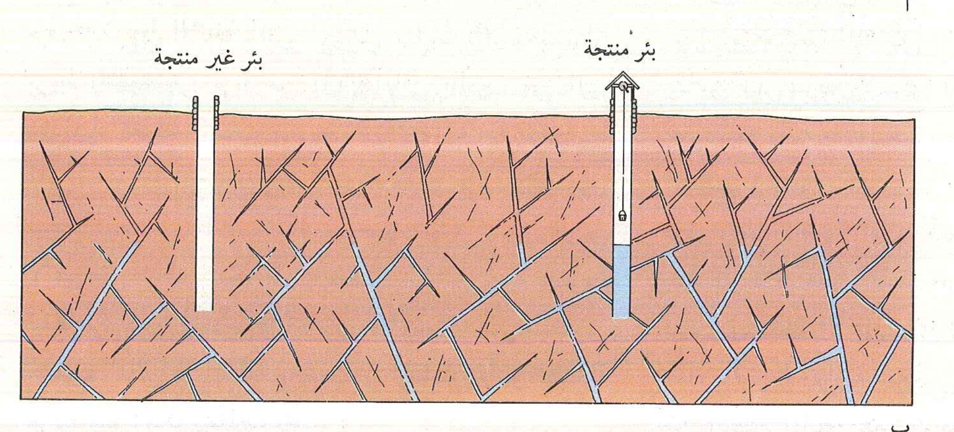
يستعمل البعض خطأً مصطلح الآبار الارتوازية للاشارة الى الآبار العميقة، كما يعتقد البعض بضرورة تدفق الماء فوق السطح لتسمية البئر بالارتوازية. فالوضع الارتوازى هو كل حالة يرتفع فيها الماء الواقع تحت الضغط فوق مستوى الماء داخل الطبقة المائية. ولا يعنى ذلك كما سنرى ضرورة انسياب الماء على السطح. ولحصول هذه الظاهرة لا بد من توفر شرطين (شكل 10 ـ 10 أ): (1) اقتصار الماء على طبقة مائية مائلة بحيث يكون احد أطرافها تكشف على السطح لاستقبال المزيد من الماء و (2) وجود طبقة لامائية فوق وتحت الطبقة المائية لمنع تسرب الماء. وعند حفر بئر تنفذ الى مثل هذه الطبقة فان الماء يرتفع تحت تأثير ضغط الماء عند الجهة الأعلى. واذا لم يكن هناك قوة احتكاك فان الماء بالبئر الارتوازية سيرتفع الى مستوى الماء بالجزء المرتفع من الطبقة المائية. غير ان قوة الاحتكاك تقلل من ارتفاع



شكل 10 ـ 8

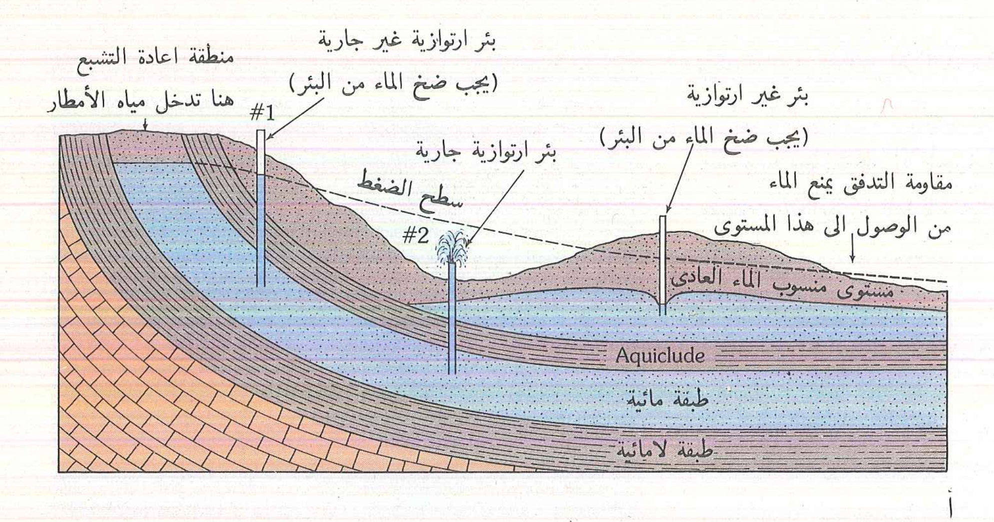
غالبا ما يتكون مخروط الانخفاض حول البئر التى تضخ منها الماء. فاذا ما زاد الضخ قد ينتج عنه جفاف الآبار الضحلة المجاورة.



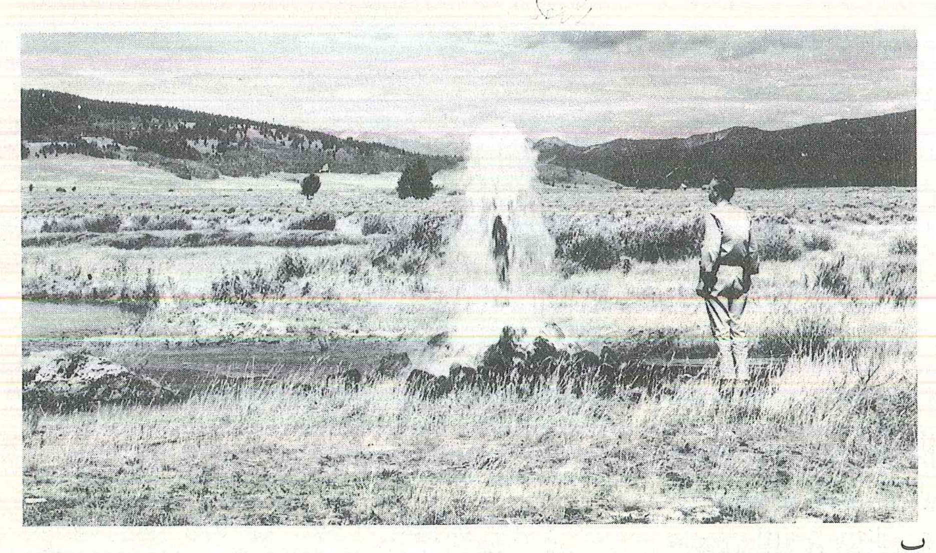


شكل 10 ـ 9

(أ) ـ الجار الذى عثر على الماء حفر بئره خلال المنسوب المائى المعلق. فى الوقت الذى يتحتم على جاره تعميق بئره للوصول الى المستوى الرئيسى المنسوب للماء. (ب) ـ ينحصر وجود الماء فى الصخور البلورية على التشققات. ويعتمد هنا مدى نجاح البئر على مرورها بشبكة كافية من التشققات.



أ



ب

شكل 10 ـ 10
(أ) ـ تحدث الظاهرة الارتوازية عندما تحاط طبقة مائية بطبقتين غير مائيتين.
(ب) ـ بئر ارتوازية جارية.

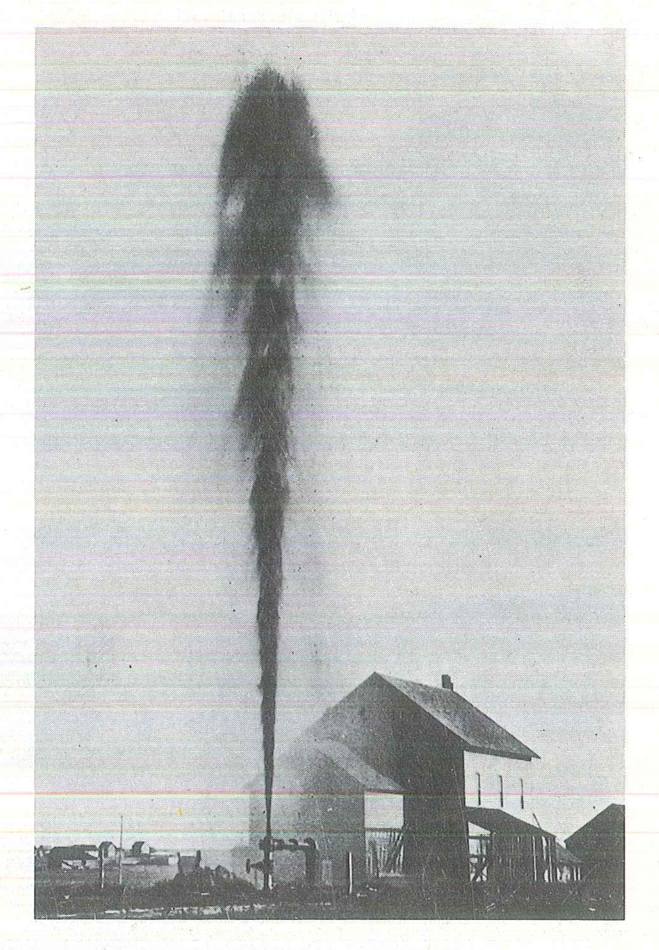
مستوى الضغط. وعموما كلما ازدادت المسافة من منطقة اعادة التشبع (المنطقة التى يتسرب فيها الماء الى الطبقة المائية المائلة) كلما زادت قوة الاحتكاك وقل ارتفاع الماء. ففى الشكل (10 ـ 10 أ) البئر رقم (1) بئرٌ ارتوازية غير متدفقة حيث ان مستوى الضغط فى موقعها يكون تحت مستوى سطح الأرض. وعندما يكون مستوى الضغط فوق مستوى سطح الأرض فان البئر المحفورة الى الطبقة المائية فى تلك المنطقة تكون بئراً ارتوازية متدفقة (البئر رقم 2) شكل 10 ـ 10 ب. وتجدر الاشارة هنا الى ان الانظمة الارتوازية لا تقتصر على الآبار بل تشمل أيضا العيون. وفى هذه الحالة تصل المياه الجوفية الى السطح خلال التشققات الصخرية بدل ارتفاعها داخل الآبار. وتعمل الظروف الارتوازية عمل القنوات فى توصيل الماء من المناطق البعيدة حيث عملية التشبع الى مناطق نقاط الدفق. ويوضح الشكل 10 ـ 11 بئرا ارتوازية يندفع منها الماء عدة امتار فوق السطح. وفى بعض الأماكن يستعمل الماء المتدفق من الآبار الارتوازية فى ادارة الدواليب المائية، غير ان حفر آبار اخرى خلال نفس الطبقة المائية يعمل على خفض الضغط مما يتسبب فى اختفاء الظاهرة الارتوازية ويجعل من الضرورة ضخ الماء الى السطح. وعلى مستوى آخر يمكن اعتبار شبكة

مياه المدينة كحالة ارتوازية صناعية (شكل 10 ـ 12). وهنا تعمل خزانات المياه التى يضخ الماء اليها كمناطق اعادة التشبع، بينما تشبه الانابيب الطبقة المائية المحصورة بين طبقتين لامائيتين. اما الحنفيات فتقابلها فى الطبيعة الآبار الارتوازية.

المشاكل المصاحبة لسحب المياه الجوفية

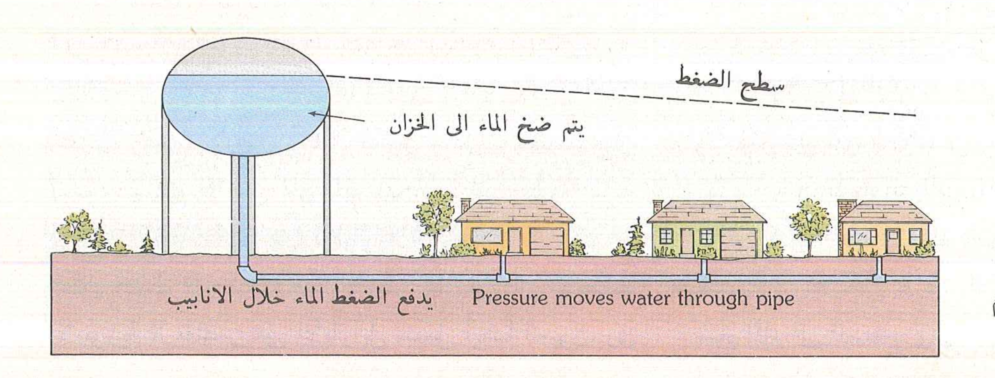
تشبه المياه الجوفية باقى الموارد الطبيعية فى الزيادة الكبيرة لمعدل استغلالها. وعليه فان عدم تقنين الاستفادة منها يهدد مصادرها، بالاضافة الى ان المشاكل العدة والباهظة التكاليف المصاحبة لعملية سحب المياه تزيد من تعقيد مشكلة تناقص الموارد المائية.

ولا تختلف الظروف المائية عن باقى النظم الطبيعية فى وصولها او محاولة الوصول الى وضع متعادل. ويمثل مستوى المنسوب المائى التوازن بين معدل الارتشاح ومعدل الدفق او السحب. وأى خلل بهذا التعادل سيؤدى الى ارتفاع او انخفاض مستوى منسوب الماء. وقد يؤدى الاخلال بالتوازن لمدة طويلة الى انخفاض كبير فى المنسوب المائى وذلك اما بحدوث نقص فى كمية التشبع الناتج عن الجفاف مثلا أو بزيادة معدل الدفق أو السحب. وكما يتوقع فقد ينخفض مستوى الماء فى مناطق عدة نتيجة للزيادة المستمرة فى السحب. وتعتبر هذه المشكلة ذات اهمية كبيرة فى المناطق



شكل 10 ـ 11

بئر ارتوازية جارية عند بداية هذا القرن. وقد نتج عن حفر آلاف الآبار خلال نفس الطبقة المائية الى اختفاء هذه الظاهرة الارتوازية بانخفاض الضغط داخل الطبقة المائية.



شكل 10 ـ 12

يمكن اعتبار شبكة مياه المدينة كنظام ارتوازى مائى.

الجافة والشبه جافة التى تعتمد على المياه الجوفية فى احتياجاتها الزراعية والصناعية. وفى الكثير من الاماكن تشبه عملية ضخ الماء عملية التعدين من المناجم بحيث انه اذا توقف ضخ المياه فورا من هذه المناطق فان مخزون المياه الجوفية لن يرجع الى وضعه الأول لقرون عدة قادمة. والمثال التالى يوضح ذلك:

لنأخذ منطقة جافة لا يزيد فيها التشبع على 5 مليمترات ومعدل ضخ يساوى 60 سنتيمترا فى السنة فاذا تم ضخ جميع محتويات الطبقة المائية سنجد معدل الضخ السنوى يساوى ما مقداره 120 سنة من التشبع. اى ان 10 سنوات من الضخ ستزيل ما مقداره تراكم مائى لمدة 1200 سنة. وعليه فان اى اعادة للتشبع اثناء الضخ لن يكون لها قيمة. ويجب ملاحظة هنا ان المشاكل التقنية والاقتصادية تحول دون ضخ مخزون الطبقة المائية بالكامل. غير ان هذا المثال صحيح من ناحية المبدأ.

الانخساف

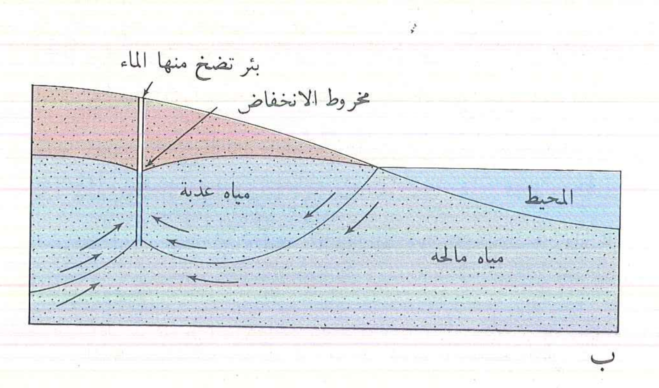
كما سنرى فى هذا الفصل ان انخساف سطح الأرض يمكن ان يحدث طبيعيا نتيجة لعوامل لها علاقة بالمياه الجوفية. فقد يغور سطح الأرض قبل ان تتمكن المياه اعادة التشبع من ملء الفراغ الناتج عن الكميات المسحوبة. وتنتشر هذه الظاهرة فى المناطق المتميزة بطبقات سميكة وغير متماسكة من الرسوبيات. وعند السحب يقل ضغط الماء بالطبقات المائية مما يدفع وزن الطبقات العليا الى ردم الرسوبيات التى تحتها وبالتالى فى انخساف سطح الأرض.

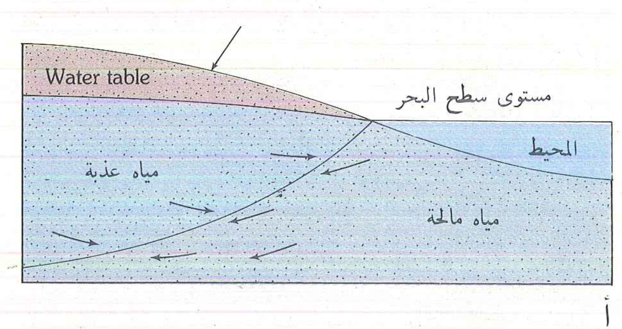
وكثيرٌ من المناطق يمكن استعمالها كأمثلة عن ظاهرة الخسف الناتجة عن عملية الاسراف فى سحب المياه من الرسوبيات الغير متماسكة نسبيا. ففى منطقة سان جوان بكاليفورنيا مثلا تسبب سحب المياه من أجل الرى فى الانخفاض التدريجى لمستوى المنسوب المائى بمقدار 30 مترا. وعليه قد انخسفت الأرض فى بعض الأماكن بمقدار 3 أمتار. والأمثلة الأخرى كثيرة. فقد تسببت الانخسافات فى الاضرار بالمبانى وأنابيب المجارى والمياه وكذلك الطرق العامة. وقد يستلزم بناء الحواجز عند الشواطىء المتأثرة بعمليات الخسف لايقاف تقدم مياه البحر.

ولعل أكثر أمثلة انخساف الأرض اثارة ما حدث بمدينة المكسيك المشيدة فوق سطح بحيرة جافة. فقد تم حفر آلاف الآبار خلال النصف الأول من هذا القرن. ونتيجة لاستمرار سحب الماء من هذه الآبار فقد وصل انخساف الأرض فى بعض اجزاء المدينة من 6 الى 7 أمتار، حيث ان هبوط مستوى بعض العمارات قد حتم تحويل مداخلها الرئيسية الى الدور الثانى.

تداخل مياه البحر

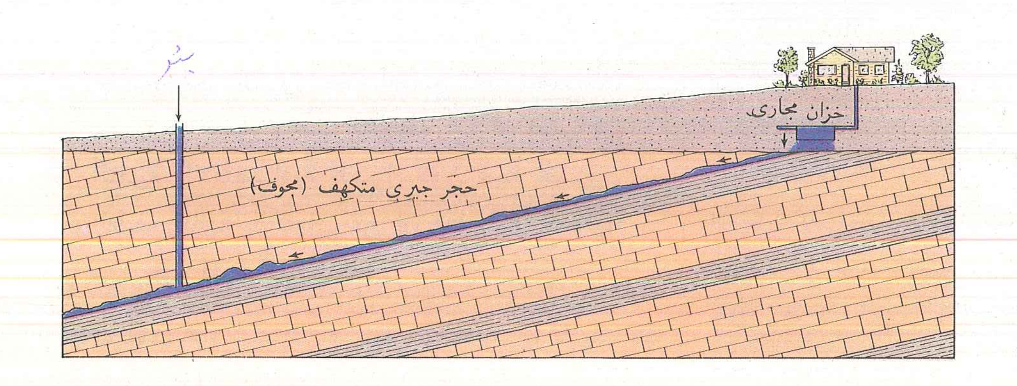
تهدد مشكلة مياه البحر المصادر المائية فى كثير من المناطق الساحلية، ولتفهم هذه المشكلة يتحتم تفحص العلاقة بين المياه الجوفية العذبة والمالحة. ويوضح الشكل (10 ـ 13 أ) هذه العلاقة بقطاع بمنطقة مبطنة برسوبيات متجانسة ونفاذة. وحيث ان كثافة المياه العذبة اقل من المياه المالحة فانها تطفو فوق المياه المالحة مكونة ما يشبه شكل العدسة ممتدا فى بعض الأحيان الى اعماق كبيرة. وفى هذا الوضع اذا ما كان مستوى المنسوب المائى يقع على ارتفاع 1 متر فوق مستوى سطح البحر فان قاعدة الماء العذب تمتد الى حوالى 40 مترا تحت سطح البحر. اى ان عمق الماء العذب تحت مستوى سطح البحر يقدر بحوالى اربعين ضعفا لارتفاع مستوى المنسوب المائى فوق سطح البحر. وعليه فان هبوط مستوى المنسوب المائى بقدر معين يعمل على ارتفاع قاعدة الماء العذب بمقدار اربعون ضعفا. واذا ما استمر تفوق كمية السحب على اعادة التشبع سيرتفع مستوى الماء المالح الى ان يصل داخل الآبار مفسدا محتواها من المياه العذبة (شكل 10 ـ 13 ب)، حيث تتأثر أولا الآبار العميقة والآبار الاكثر قربا من الشاطىء.

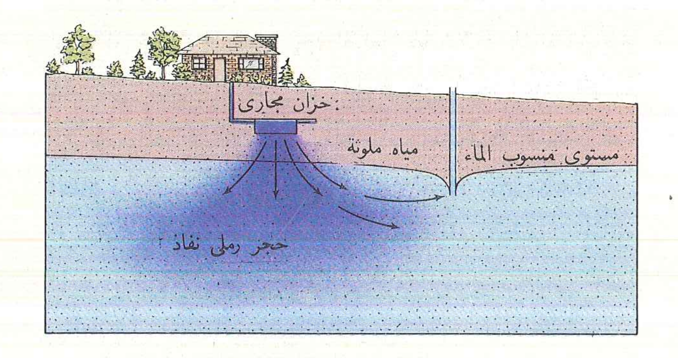




شكل 10 ـ 13

(أ) ـ حيث أن المياه العذبة أقل كثافة فانها تطفو فوق المياه المالحة مكونة عدسة والتى قد تمتد تحت مستوى سطح البحر. (ب) ـ عندما يزيد الضخ فان مستوى المنسوب المائى ينخفض مما يدفع عمق الماء بما قيمته 40 ضعفا وبالتالى تداخل مياه البحر.





0 10
أمتار

شكل 10 ـ 14

(أ) ـ بالرغم من حركة الماء ما يقارب 100 متر قبل وصوله البئر رقم (1) الا ان التجاويف بالحجر الجيرى جعلته يتحرك بسرعة وبالتالى عدم تنقيته. (ب) ـ حيث أن الطبقة المائية مكونة حجرا رمليا فانها تقوم بتنقية الماء خلال بضعة أمتار.

وفى المناطق الساحلية ذات النشاط العمرانى تزيد مشكلة الضخ تعقيدا عند اقترانها بالانخفاض فى عملية اعادة التشبع الناتجة عن تغطية مساحات واسعة برصف الشوارع ومحطات الوقود واقامة المبانى.

ولتصحيح هذه المشكلة يمكن حفر مجموعة آبار ليتم اعادة ضخ الماء الزائد عن طريقها الى خزانات المياه الجوفية. ويتم كذلك بناء خزانات على السطح لتجميع مياه الأمطار، ثم تركها لتنفذ الى باطن الأرض. فقد تم تطبيق

هاتين الطريقتين بشيء من النجاح فى جزر اللونج حيث تم تفهم مشكلة تداخل مياه البحر منذ 40 سنة.

تلوث المياه الجوفية

تعتبر مشكلة المياه الجوفية ذات أبعاد خطيرة وخاصة فى المناطق التى تعتمد اساسا على المياه الجوفية كمصدر اساسى لها. واكثر انواع التلوث انتشارا تلك التى لها علاقة بمخلفات المجارى. وعادة ما يكون مصدر هذا التلوث خزانات المجارى المتزايدة فى عددها يوما بعد يوم، بالاضافة الى شبكات المجارى غير الملائمة ورمى المخلفات فى الفضاء الطلق.

وتحدث عملية تطهير المياه الملوثة بالبكتيريا طبيعيا حيث يتم تصفيتها بواسطة الرسوبيات التى يتخللها الماء او قد يتم القضاء عليها بواسطة اكسدتها كيميائيا بالاضافة الى استهلاكها بواسطة الكائنات الحية الاخرى. غير ان الظروف المحيطة بالطبقة المائية يجب ان تكون ملائمة لعملية التنقية. فالطبقات ذات النفاذية العالية التى قد تنتج عن الصخور البلّورية المتشققة ورسوبيات الحصى أو فجوات الصخور الجيرية يمكن ان تمر من خلالها المياه الملوثة دون تنقية حيث ان الماء يتخللها بسرعة من غير ان يكون له الوقت لملامسة ما حوله. هذه هى مشكلة البئر رقم (1) فى الشكل 10 ـ 14 . وبالعكس من ذلك فان الطبقات المائية المكونة من الرمال أو الصخور الرملية النفاذة يمكن ان يتم تطهير المياه المارة بها لمسافات قصيرة قد تبلغ احيانا بضع عشرات من الامتار. فالفراغات من حبيبات الرمل تسمح للماء بالمرور ولكن ببطء كاف لتطهيرها (البئر رقم (2) شكل 10 ـ 14).

وفى بعض الأحيان قد تؤدى مشكلة الضخ الى استحداث مشكلة التلوث. فعند ضخ كمية كافية من الماء خلال احد الآبار، فان مخروط الانخفاض سيزيد من شدة ميل المنسوب المائى وربما يعكس اتجاه ميلها مما يتسبب فى تلوث الآبار التى كانت مياهها صالحة للاستعمال (شكل 10 ـ 15). وما يجب تذكره ان زيادة معدل سرعة المياه الجوفية يزداد كلما زاد انحدار المنسوب المائى.

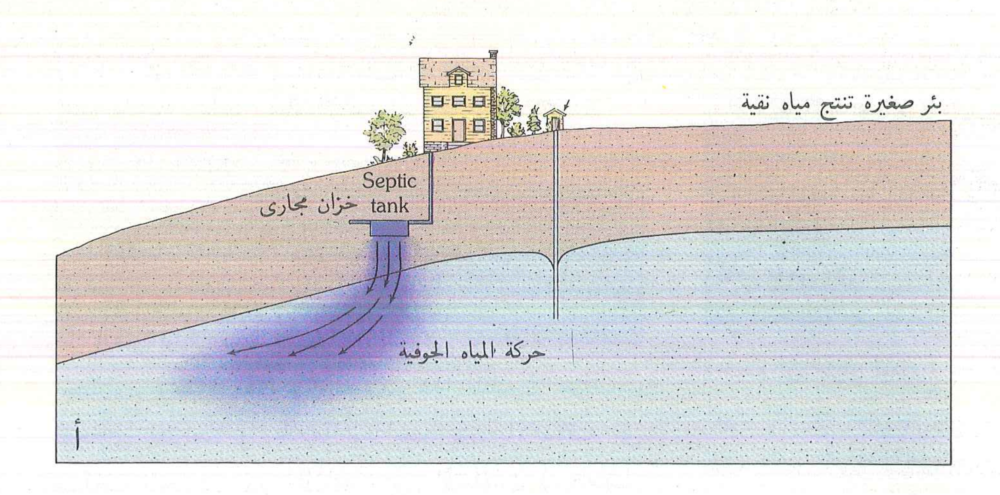
وتمثل كذلك مواقع تفريغ النفايات مصدراً آخر للتلوث قد يهدد مصادر المياه الجوفية بمناطق تواجدها. فعند هطول المطر يعمل الماء المتسرب خلالها على اذابة مواد عضوية وغير عضوية مختلفة والتى قد يكون من بينها ما هو ضار. وحيث ان المياه الجوفية بطيئة الحركة فقد لا تكتشف هذه المواد الا بعد تسربها بمدة طويلة. وعند اكتشافها ستكون كمية المياه الملوثة ضخمة وحتى اذا ما تم الاستغناء عن هذا المصدر الملوث (فى كثير من الاحيان لا يحدث ذلك) فان المشكلة ستبقى لسنوات طويلة، حتى يتم ابتعاد المياه الملوثة عن تلك المنطقة.

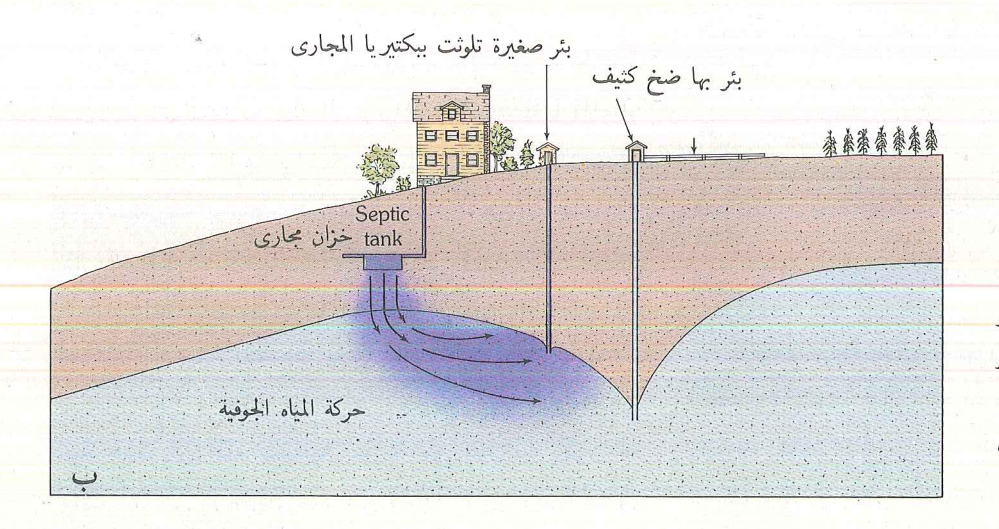
العيون الساخنة والحمات والطاقة الحرارية الأرضية

العيون الساخنة

ترتفع درجة حرارة العيون الساخنة من 6° ـ 9° م عن المعدل السنوى لدرجة حرارة الهواء الجوى بمنطقة تواجدها. وتوجد اعداد هائلة من هذه العيون فى مناطق عدة من العالم حيث تبلغ فى بعض البلدان الألف فى عددها .

ولقد تبين من التنقيب عن المعادن ومن آبار النفط ان درجة الحرارة تزيد بزيادة العمق وذلك بمعدل درجتين مئويتين كل مائة مترٍ. وعليه فان المياه المارة بطبقات على اعماق كبيرة ترتفع درجة حرارتها، وقد تصل المياه ساخنة الى السطح. وتزيد درجة الحرارة فى مثل هذه الحالات بمعدل 2° م فى كل 100 متر. اى عند وصول المياه الى اعماق كبيرة ترتفع درجة حرارتها وعند وصولها الى السطح تخرج على شكل عيون ساخنة. وقد وجد مثلا فى شرقى الولايات المتحدة الأمريكية ان العيون الساخنة تتم عملية تسخين مياهها بهذه الطريقة. غير أن 95 فى المائة من العيون الساخنة (والحمات) فى تلك البلاد تتواجد فى غربها. والسبب





شكل 10 ـ 15

(أ) ـ كانت أولا محتويات خزان المجارى تتحرك بعيدا من البئر الصغيرة. (ب) ـ زيادة الضخ فى البئر الثانية تسببت فى تغير ممال المنسوب المائى مما جعل محتويات خزان المجارى تتحرك تجاه البئر الصغيرة.

فى هذا التوزيع ان مياه هذه العيون تستمد حرارتها من عملية التبريد التى تمر بها الصخور النارية فى تلك المناطق.

الحمّامات

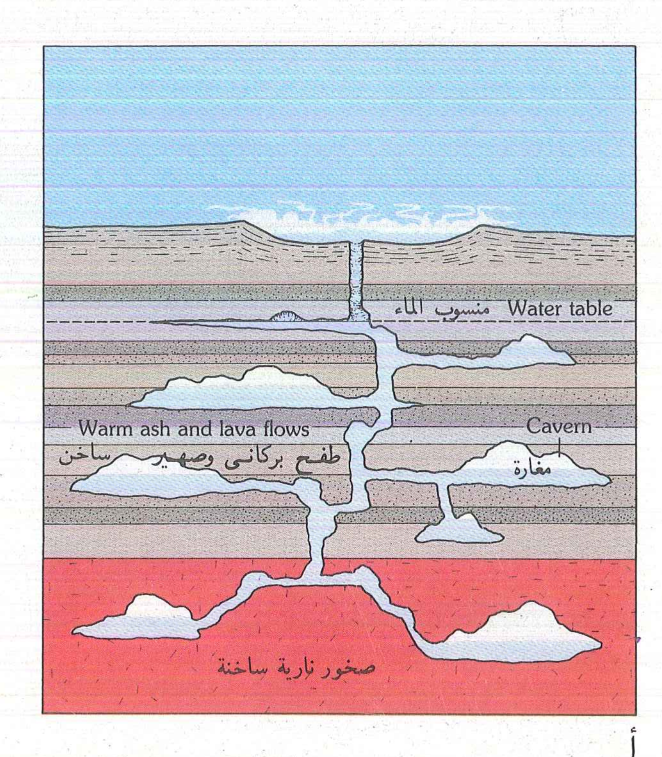
الحمّامات نوع من اشكال العيون الساخنة أو النافورات التى تدفع بقوة وعلى فترات اعمدة من الماء غالبا ما تتراوح فى ارتفاعها بين 30 و 60 مترا. وبين فترات توقف دفع الماء ينطلق عمود من البخار، عادة ما يكون مصحوبا بقرقعة. اما اشهر الحمّامات فى العالم فقد تكون حمّة منتزه البيلوستون بأمريكا والتى تندفع تقريبا كل ساعة (شكل 10 ـ 16). كما توجد الحمّات بأماكن اخرى من العالم مثال نيوزيلندة وايسلندة تحت تسميات تختلف ولكنها تعنى فى مجملها المتدفقات.

وتتكون الحمّات بتسخين المياه الباطنية فى تجويف ارضى تكون المياه فى قاعها تحت ضغط مرتفع بفعل تأثير ضغط المياه التى تعلوها وبالتالى يلزم لغليانها درجة حرارة اعلى من 100° م. فمثلا عند قاع احد التجويفات البالغ عمقها

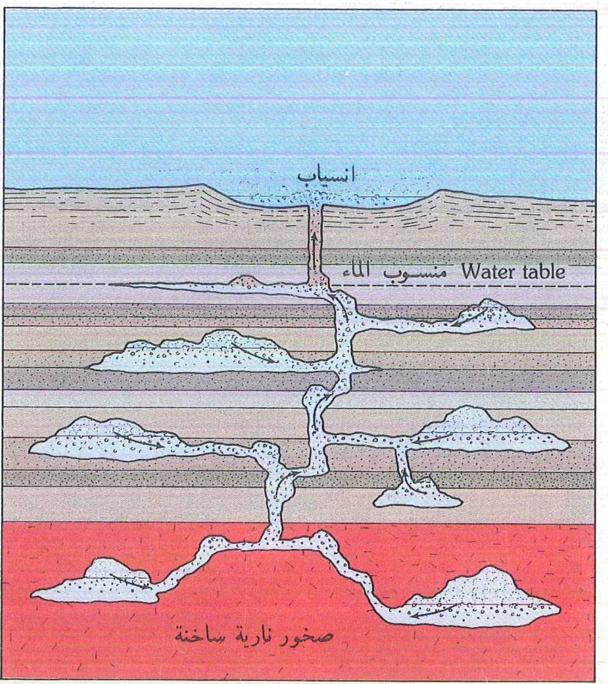
شكل 10 ـ 16

أولد فيتفول ـ من أشهر حمّات العالم وهو يدفع بحوالى 45,000 لتر من المياه الساخنة والبخار كل ساعة تقريبا.

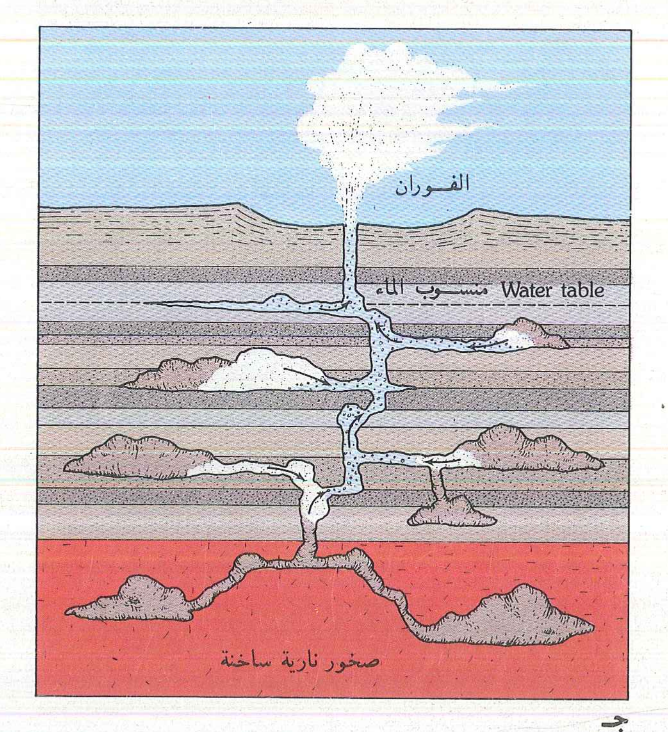




أ



ب



جـ

شكل 10 ـ 17

رسم تخطيطى لحمّة مثالية. تحدث الحمّات ما لم تتوزع المياه بواسطة تيارات الحمل. (أ) ـ ترتفع درجة حرارة الماء بقرب القاع عند نقطة تقارب درجة الغليان وهى أعلى منها عند السطح وذلك لزيادة الضغط تحت تأثير وزن الماء الذى يعلوه.(ب) ـ ترتفع كذلك درجة حرارة الماء أعلى تركيبة الحمّة مما يعمل على تمدده ومن ثم انسيابه على السطح مخففا من الضغط أسفل الحمّة عند القاع. (جـ) ـ عند انخفاض الضغط يحدث الغليان ويندفع على هيئة بخار مما يتسبب فى فورانها وتفجرها.

300 مترٍ يلزم لغليان الماء درجة حرارة تبلغ 230° م. وحيث ان ارتفاع درجةالحرارة ينتج عنه تمدد الماء وبالتالى وصوله الى السطح تحت ضغط اقل فانه يتحول فورا الى بخار ماء متدفق كحمّة (شكل 10 ـ 17). وبعد ذلك تتسرب المياه الجوفية الباردة الى التجويف الأرضى مرة اخرى لتبدأ الدورة من جديد. وحيث ان للماء الساخن قدرة اكبر على الاذابة من الماء البارد فان مياه الحمّات والعيون الساخنة

شكل 10 ـ 18

الترسبات المعدنية تحيط عيون الماموت الساخنة.



شكل 10 ـ 19

استغلال الطاقة الحرارية الأرضية بالمكسيك.

تحمل مواد ذائبة كثيرة. فالمياه الغنية بالسليكا ترسب **الجيزاريت** حول العين اما الترافرتين (نوع من الكالسيت) فهو يميز العيون الساخنة بمناطق الاحجار الجيرية (شكل 10 ـ 18). اما مياه العيون الحاوية للكبريت فان طعمها غير مستساغ للشرب زيادة على انبعاث رائحة البيض الفاسد منها. وهى الرائحة المميزة لغازات الكبريت. ومما لا شك فيه ان ما تعرف بعين البيض الفاسد بولاية نيفادا الأمريكية مثال لذلك.

الطاقة الحرارية الأرضية

كثير من الحمّات حول العالم تمثل مواقع كافية **لطاقة الحرارة الأرضية** يمكن الاستفادة منها لتوليد الطاقة. ففى نيوزيلندة وايطاليا والمكسيك والاتحاد السوفيتي وامريكا يستفاد من اندفاع ابخرة الحمم فى توليد الطاقة الكهربائية (شكل 10 ـ 19). وبالنظر الى العوامل الجيولوجية التى تعمل على توفير الظروف المناسبة لتواجد الطاقة الحرارية الأرضية ذات القيمة الاقتصادية وجد ان من اهمها:

(1) مصدر حرارى فعال كتجويف كبير من الصهير على عمق مناسب لتوفير ضغط مرتفع كافٍ ومعدل برودة بطيء. غير ان الاعماق الشديدة قد تسبب فى كبح القدرة الطبيعية للدورة المائية.

(2) خزانات طبيعية كبيرة ذات مساحة متصلة بالمصدر الحرارى عن طريق قنوات يمكن للماء ان يدور بقربها قبل تجمعه فى الخزانات.

(3) غطاء طبقى بصخور غير نفاذة لمنع انسياب الماء وفقدان الحرارة الى السطح. فالخزانات المعزولة العميقة يرجح احتوائها على طاقة حرارية اكبر من مثيلاتها غير المعزولة.

وبالرغم من اننا ما زلنا لا نستطيع ان نحكم على مدى فاعلية البخار الطبيعى فى سد جزء من احتياجات العالم للطاقة الكهربائية، غير ان الحاجة لاستحداث مصادر جديدة للطاقة تحتم محاولة الاستفادة منها.

الآثار الجيولوجية للمياه الجوفية

تغطى الصخور القابلة للذوبان وخاصة الحجر الجيرى ملايين الكيلومترات المربعة. وتقوم المياه الجوفية بدور رئيسى فى تعريتها وذلك باذابة هذه الصخور. فالصخور الجيرية غير القابلة تقريبا للذوبان فى المياه النقية يمكن اذابتها اذا ما حوت المياه المؤثرة فيها نسبة قليلة من حامض الكربونيك. وذوبان ثانى اكسيد كربون الهواء الجوى أو الناتج عن تحلل النباتات يزود معظم المياه الطبيعية بهذا الحامض الضعيف. وعند مرور المياه الجوفية بالصخور الجيرية يتفاعل حامض الكربونيك مع كالسيت هذه الصخور معطيا بيكربونات الكالسيوم القابلة للذوبان فى الماء. وبالتالى يتم نقلها بواسطة المياه الجوفية المتحركة.

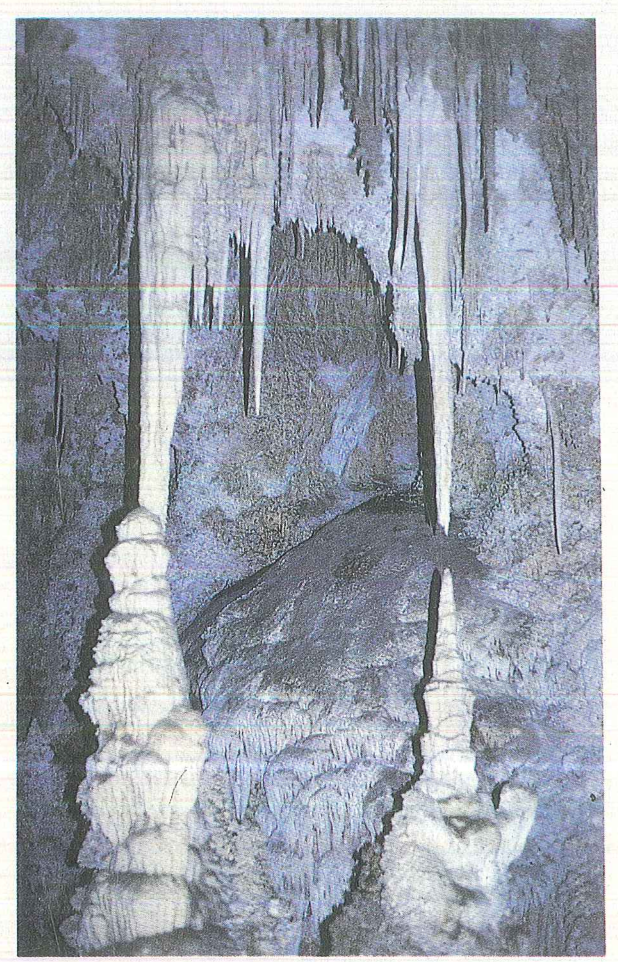
المغارات

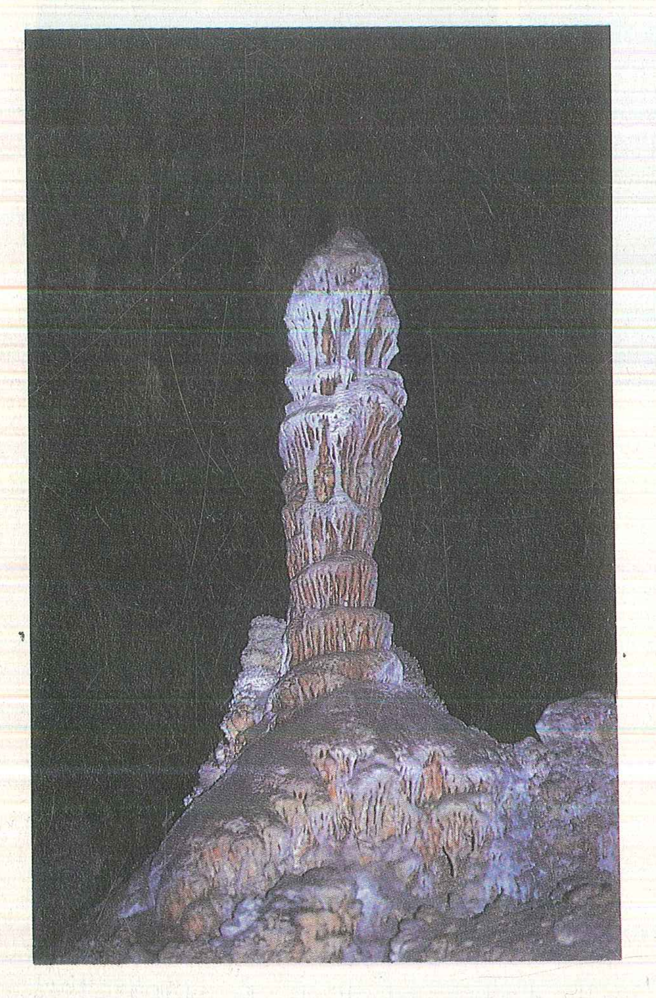
من أشهر اعمال التعرية للمياه الجوفية تكوين المغارات بالصخور الجيرية. والمغارات متباينة الاحجام بعضها صغير والبعض الآخر كبير جدا. فمثلا احد التجاويف بمغارة كارلسباد بنيومكسيكو تتسع الى اكثر من اربعة عشر ملعبا لكرة القدم. وارتفاع يسع مبانى ناطحات السحاب والمثل الثانى مغارة الماموت بكونتاكى والتى يبلغ طول تجاويفها المتصلة خمسون كيلومترا.

ويعتقد ان معظم المغارات قد تكونت عند او تحت المنسوب المائى بالنطاق المشبع،حيث يتتابع مرور المياه الجوفية بمواقع الضعف فى الصخور مثال التصدعات والسطوح الطبيعية. وبمرور الوقت تستمر عملية اذابة الصخور فى مناطق الضعف وتتكون فجوات تتسع ببطء حاملا الماء المواد المذابة منها الى مجارى تصريف المياه الطبيعية. وبالطبع فان من اهم المعالم التى تثير فضول زائرى هذه المغارات، المظهر المدهش الذى تشكله من ظاهرة تنقيط الماء بتجويف المغارة على مدى طويل مرسباً صخر الترافرتين الذى غالبا ما يعرف **بحجر القطر** اشارة واضحة الى اصل تكوينه.

وبالرغم من ان المغارات تتكون فى النطاق المشبع الا ان تكوينات الصخور المترسبة داخلها لا يمكن ان تتراكم الا بعد ان تصبح المغارة فوق هذا المستوى، اى داخل النطاق الهوائى وهذا غالبا ما يحدث اذا ما قطع النهر فى مجراه مسببا نزولا فى المستوى المائى تبعا لمنسوب النهر. وبمجرد امتلاء المغارة بالهواء تكون جاهزة لمرحلة بنائها وزخرفتها من الداخل.

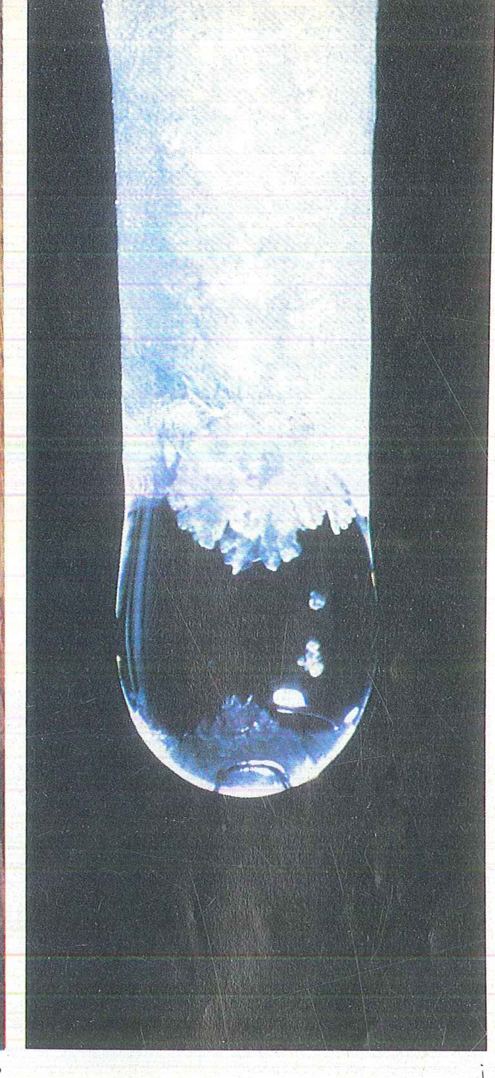
واحجار القطر الموجودة فى المغارات على اختلاف اشكالها تعرف **بالسبيليوتيم** ويلاحظ ان لكل منها شكل خاص ومميز لا يماثل تماما أى من الأشكال الأخرى (شكل 10 ـ 20). ومن اكثر احجار القطر شيوعا تلك التى تعرف **بالهوابط** وهى تشبه الدلاه الجليدية معلقة بأسقف المغارة حيث ينساب الماء قرب مواقع التشقق. وعند ملامسة الماء للهواء بالمغارة ينطلق البعض من ثانى اكسيد الكربون الذائب وذلك عن طريق البخر، ويتم ترسيب كربونات الكالسيوم المتبقية على شكل دائرة حول حافة قطرات الماء. ومع كل قطرة يتسرب قليل من الكالسيت مكونا انبوبة مجوفة من الحجر الجيرى. ويستمر الماء فى نزوله نظيفا الى





شكل 10 ـ 20

السبليوتيم أنواع عدة من الترسبات تشمل الهوابط والصواعد والأعمدة. الكهف الجديد بنيومكسيكو.



ب
أ

شكل 10 ـ 21

(أ) ـ شاروقة كالسيت منفردة. (ب) ـ مجموعة شاروقات بمغارة كارلسباد.

نهايتها ببطء حتى يصل الى أرضية المغارة. ويطلق على هذه الأنابيب مجازا شاروقة المشروبات (شكل 10 ـ 21). وهى غالبا ما تسند نهايتها او تزيد كمية الماء المنسابة حواليها مرسبة على سطحها الخارجى المزيد من الكالسيت. وبمرور الزمن تأخذ شكلها المخروطى المألوف.

أما رسوبيات القطر الاخرى الشائعة فهى التى تتراكم على القاع متجهة الى اعلى وتعرف **بالصواعد**. وهى تتكون من رسوبيات الكالسيت المحمول مع قطرات الماء المتساقطة على أرضية المغارة وعليه فان الصواعد مصمته أى غير مجوفة، كما انها اكثر دائرية فى مظهرها عند نهايتها من الهوابط.

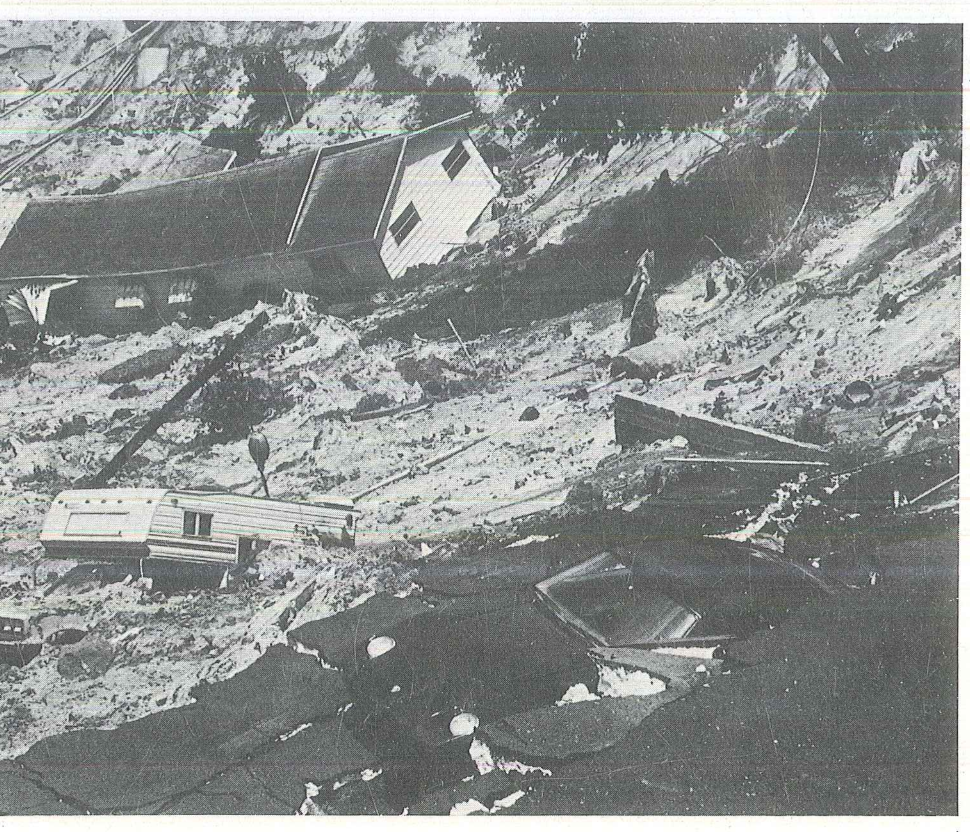
طبوغرافية الكارست

تعرف **طبوغرافية الكارست** بأماكن عديدة من العالم. وهى منخفضات تتكون بفعل قدرة المياه الجوفية على اذابة الصخور. وقد اشتق هذا الاسم من سهل يقع بالشمال الغربى للبحر الأدرياتيكى على الحدود بين ايطاليا ويوغوسلافيا، حيث ان هذه السمات الطبيعية كثيرة الانتشار. وهى بصورة عامة لا تتكون فى المناطق الجافة ولا شبه الجافة. أما وجودها فى مثل هذه المناطق فيدل على غناها بالمياه فى وقت من الأوقات. وتتميز مناطق الكارست بتوزيع غير منتظم لمنخفضات تسمى **البالوعات**.

وتتكون البالوعات بأحدى طريقتين. فبعضها يتكون بالتدريج على مدى سنوات عدة دون اى تأثير على وضع الصخور. وفى هذه الحالة تذاب الصخور الجيرية الواقعة تحت التربة مباشرة بواسطة مياه الامطار المتسربة والحاوية على شحنات جديدة من ثانى اكسيد الكربون. وتتميز هذه المنخفضات بضحالتها وقلة انحدارها. وعلى العكس من ذلك فان البالوعات يمكن ان تتكون فجأة عند تهاوى اسقف الكهوف تحت ضغط وزنها. وعادة ما يكون هذا النوع من البالوعات عميقاً وشديد الانحراف عند الجوانب. وقد تسبب هذه الانخفاضات كارثة جيولوجية عند حدوثها فى مناطق مأهولة بالسكان. ويوضح الشكل 10 ـ 22 بالوعة تكونت فى حديقة ونتر بفلوريدا بتاريخ 8 مايو 1981، وذلك قبل اخذ هذه الصورة بيوم واحد. وقد تسببت هذه البالوعة فى هدم منزل وحوض سباحة المدينة ومجموعة سيارات وموقف سيارات الى جانب طريق. وعموما فان تكوّن هذه البالوعات ليس بغريب عن هذه المنطقة. فالبالوعة المذكورة اعلاه كانت احد ثلاثة بالوعات تكونت فى ظرف اسبوعين. ويعتقد ان تكوّنها له علاقة بانخفاض مستوى منسوب الماء عقب فترة جفاف. فانخفاض مستوى المنسوب المائى ترك اسقف هذه التجاويف من دون سند مما تسبب فى تهدمها.

وتتميز مناطق البالوعات بغياب نظام صرف مائى على السطح. وتقوم البالوعات بتصريف مياه الأمطار الى المنسوب المائى. وعند وجود مجارى تصريف سطحية فانها تكون قصيرة جدا وعادة ما تعكس اسماءها وواقع حالها، مثال الجداول المطمورة والرافد المطمور وغيرها. وقد يتم سد بعض البالوعات بالطين وحطام الصخر حيث تتكوّن مستنقعات وبحيرات صغيرة.

أ



ب

شكل 10 ـ 22

(أ) ـ منظر جوى لبالوعة حديقة ونتر فى شهر الماء (مايو) سنة 1981 م.

(ب) ـ منظر قريب لبالوعة حديقة ونتر.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ قارن بين النطاق الهوائى والنطاق المشبع. فى أى هذين النطاقين توجد المياه الجوفية؟

2 ـ عادة ما يكون خط المنسوب المائى غير افقى. فسرّ ذلك.

3 ـ ما هو النهر المتأثر؟ وبماذا يختلف عنه النهر المؤثر؟

4 ـ ميّز بين المسامية والنفاذية.

5 ـ ما الفرق بين الطبقة المائية واللامائية؟

6 ـ تحت أى ظروف تكون الطبقة لامائية بالرغم من مساميتها العالية؟

7 ـ كما هو مبين بالشكل 10—5 فان الماء عادة ما يتحرك فى مسارات ملتوية. ما هى العوامل المسببة لاتباع مثل هذه المسارات؟

8 ـ اشرح باختصار دور هنرى دارسى فى تبلور مفهوم حركة المياه الجوفية.

9 ـ عند وجود طبقة لامائية فوق مستوى المنسوب المائى يتكون نطاق مشبع محدود. ماذا تسمى هذه الظاهرة؟

10 ـ جارين قام كل منهما بحفر بئر. وبالرغم من ان البئرين متساويان فى العمق فقد وجد احدهما الماء ولم يوفق الآخر. اشرح الظروف التى قد تكون سببا فى ذلك.

11 ـ ما المقصود بكلمة ارتوازى؟

12 ـ ما هما الشرطان اللازم توفرهما لتكوين وضع ارتوازى؟

13 ـ ما السبب وراء اختفاء الظاهرة الارتوازية فى منطقة ما؟

14 ـ لماذا يشكل ضخ الماء مشكلة فى بعض المناطق الجافة وشبه الجافة؟

15 ـ اشرح ماذا حدث فى مدينة المكسيك نتيجة لسحب الماء بكميات كبيرة؟

16 ـ فى منطقة ما يصل مستوى المنسوب المائى الى 4 أمتار فوق مستوى سطح البحر. فالى أى عمق تحت مستوى سطح البحر تتوقع أن تصل المياه العذبة؟

17 ـ لماذا تقل عملية تشبع الخزانات الجوفية من المياه العذبة فى المناطق المتطورة عمرانيا؟

18 ـ أى الطبقات المائية اكثر فاعلية فى تنقية المياه الجوفية الملوثة: الحصى الخشن، الرمل، الحجر الجيرى المجوف؟

19 ـ ما هو مصدر الحرارة لمعظم الينابيع الساخنة والحمّات؟ كيف ينعكس ذلك على توزيع هذه الظواهر؟

20 ـ اذكر أهم نوعين من الظواهر التى توجد بالمغارات وقارن بينهما .

21 ـ تتكون رسوبيات المغارة فى النطاق المائى. ناقش هذه العبارة متعرضا بالشرح الى مدى صحتها من عدمه .

22 ـ ماذا تسمى الظواهر الطبوغرافية الناتجة عن تعرية المياه الجوفية؟

23 ـ اذكر طريقتين لتكوّن البالوعات .

الكلمات الدالة :

ارتوازى	artesian
بالوعة	sinkhole
بئر	well
بئر ارتوازية غير جارية	nonflowing artesian well
حمّة	geyser
خاصية الأنابيب الشعرية	capillary fringe
سبيليوتيم	speleothem
صواعد	stalagmite
طاقة حرارة ارضية	geothermal energy
طبقة مائية	aquifer
طبقة لامائية	aquiclude
طبوغرافية الكارست	karst topography
عين ساخنة	hot spring
عين مائية	spring
قانون دارسى	Darcy's law
مجرى مائى متأثر	effluent stream
مجرى مائى مؤثر	influent stream
مخروط الانخفاض	cone of depression
مسافة رأسية	head
مسامية	porosity
مغارة	cavern
ممال مائى	hydraulic gradient
منسوب الماء	water table
منسوب مائى معلق	perched water table
مياه جوفية	groundwatr
مياه باطنية	underground water
نزول مستوى منسوب الماء	drawdown
نطاق التربة المتشبع	belt of soil moisture
نطاق التشبع	zone of saturation
نطاق التهوية	zone of aeration
نفاذية	permeability
هوابط	stalactite